creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

시스템 안정도를 고려한 직류 배전 시스템 설계기법 연구

Design Technique Research of DC Distribution System Considering System Stability

2012 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

박 철 우

공학석사학위논문

시스템 안정도를 고려한 직류 배전 시스템 설계기법 연구

Design Technique Research of DC Distribution System Considering System Stability

2012 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

박 철 우

시스템 안정도를 고려한 직류 배전 시스템 설계기법 연구

Design Technique Research of DC Distribution System Considering System Stability

지도교수 조 보 형

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2012 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

박 철 우

박철우의 공학석사 학위논문을 인준함

2012 년 8 월

위 원 장 : 정 현 교

부위원장 : 조 보 형

위 원 : 하 정 익

초록

최근 환경오염, 자원고갈, 기후변화, 지구온난화 등의 환경문제가 대두됨에 따라 신재생에너지의 사용이 증가하고, 신재생 에너지 시스템이 구축된 배전 시스템의 효율적인 구성과 운영이 필요함에 따라 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 직류배전 시스템은 신재생 에너지와 연계되어 전체 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 가능성을 바탕으로, 교류 배전의 대안으로 제시되고 있으며 데이터 센터를 시작으로 주거 건물까지 그 연구범위가 확대되고 있다[1,6,13,17].

직류 배전 시스템은 계통으로부터 공급되는 교류전원을 건물내부에서 직류전원으로 변환하고, 내부 시스템에서 직류 배선을 통해 부하와 분산 전원시스템 사이에 직류 전력을 주고 받는다. 이러한 전력전달 구조는 전원 시스템과 부하 사이의 전력 변환 과정을 감소시켜 시스템의 에너지 효율 향상을 꾀할 수 있다.

본 논문에서는 부하 변동과 사고 상황에 따른 직류 배전 시스템의 배전 전압 변동을 관찰하고 배전전압의 안정성(Stability)이 전체 시스템의 동작에 미치는 영향을 분석한다. 직류 배전 시스템의 경우, 교류 배전 시스템과 달리 분전반의 교류/직류 전력변환장치의 유한한 출력 임피던스 특성에 의해 전체 건물 내부의 배전라인이 영향을 받게 되기 때문에, 고품질의 전력을 공급하기 위해서는 시스템 설계에 있어서 시스템 구성

요소간의 임피던스 상호작용(Interaction) 및 사고(Fault)에 대한 분석이 필수적이다.

본 논문에서는 직류 배전 시스템의 배전 전압에 영향을 미치는 시스템 요소를 파악하기 위해, 하나의 소스단 전력변환기(Pre-Regulator)와 서로 다른 부하 타입의 전력변환기를 연결하여 시스템을 구성하고 부하변동과 사고 상황을 가정하여 배전 라인의 전압변동을 살펴본다. 이를 통해 직류 배전 시스템 구현 시 일어날 수 있는 문제점을 분석하고, 배전 라인이 안정적으로 구성될 수 있는 설계 요소와 기준, 설계 가이드를 제시한다.

주요어 : 직류 배전 시스템, 배전 라인, 안정성

학 번 : 2010-20813

목차

초록 **ii**

목차 **iv**

제 1 장 서론 **1**

1.1 연구의 배경 및 목적 1
1.2 논문의 구성 3

제 2 장 직류 배전 시스템의 특성 및 분석 **4**

2.1 직류 배전 시스템의 구성 4
2.2 직류단 전압 변동의 원인 분석 1 4
2.2.1 계통 전원 불안정으로 인한 전압변동 1 4
2.2.2 부하단 사고 상황으로 인한 전압변동 1 7
2.2.3 부하 변동으로 인한 전압변동 2 0

제 3 장 부하 시스템 사고 및 부하 변동 분석 **2 2**

3.1 부하 사고에 의한 전압 변동 관찰 2 2
3.2 사고 차단 및 전압 안정화 방법 2 5
3.3 불안정한 시스템 상황에서 부하량 변화 3 1
3.4 임피던스 특성 향상 방법 및 안정화 방법 3 7
3.5 모의 실험 결과 분석 4 9

제 4 장 계통 입력 전압 사고 상황 분석 **5 0**

4.1 계통 사고 상황 설계 5 0
4.2 직류단 안정화 방법 5 5
4.3 모의 실험 결과 분석 및 결론 6 3

제 5 장 결론 및 향후 과제 6 5

참고문헌 6 7

ABSTRACT 7 1

감사의 글 오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.

그림 목차

그림 2.1 배전 시스템의 연결 구조: (a) 교류 시스템, (b) 직류 시스템 5
그림 2.2 신재생 에너지 발전과 부하 사용량 프로파일..... 6
그림 2.3 직류 배전 시스템의 분산 전원 및 배터리 연결 구조 7
그림 2.4 교류 배전 시스템(위)과 직류 배전시스템(아래)의 신재생 에너지..... 8
그림 2.5 입력 PFC 등가회로 9
그림 2.6 배전라인의 등가 출력 임피던스 구성:..... 1 0
그림 2.7 출력 캐패시터 변화에 따른 출력 임피던스 변화..... 1 1
그림 2.8 직렬 연결된 두 시스템의 개념도..... 1 2
그림 2.9 계통 사고 상황의 입력 전압..... 1 5
그림 2.10 계통 순시 전압 강하에 따른 배전 라인 전압 변화 1 6
그림 2.11 병렬 연결된 부하 시스템간의 사고 상황 및 전달 방향 1 7
그림 2.12 부하 사고 상황 시 단락 전류와 배전 전압의 관계 1 8
그림 2.13 부하 사고 상황 및 퓨즈 차단에 의한 배전 전압 변화 1 9
그림 2.14 대용량 부하의 부하량 변화와 직류 배전 전압 변화 2 1
그림 3.1 시스템 연결 및 부하 시스템의 사고 상황 발생 구조 2 3
그림 3.2 부하1의 사고 발생시 부하2 연결 배전전압 변화..... 2 4
그림 3.3 사고 상황에서 전류 흐름..... 2 5
그림 3.4 캐패시터 용량 증가에 따른 배전 라인 전압 변화.... 2 6
그림 3.5 단락 전류 파형 2 7
그림 3.6 간략화된 단락 전류 파형..... 2 7
그림 3.7 전압 강하 해결을 위한 캐패시터 추가 위치 2 9
그림 3.8 조합된 캐패시터 용량 추가에 따른 배전 라인 전압 변화..... 3 0
그림 3.9 입출력 임피던스와 전압 전달 관계 3 1
그림 3.10 부하 시스템의 임피던스 특성..... 3 2
그림 3.11 직렬 연결된 Sub-system..... 3 3

그림 3.12 모의 실험에 사용된 직류 배전 구조..... 3 4
그림 3.13 주파수 분석 – Impedance Interaction 3 5
그림 3.14 불안정한 시스템의 배전 전압 변화 3 6
그림 3.15 부하, 전원 시스템의 임피던스 비교 3 7
그림 3.16 입력필터 변화에 따른 입력 임피던스 변화 3 8
그림 3.17 실험에 사용된 출력 전류 Feed-Forward..... 3 9
그림 3.18 출력 전류 Feed-Forward가 적용된 Loop 구조.... 4 0
그림 3.19 Feed-Forward 적용에 따른 임피던스 변화..... 4 1
그림 3.20 출력 임피던스 제한 기준과 입력 임피던스 비교 ... 4 2
그림 3.21 5kHz 대역의 Impedance Interaction 형태..... 4 3
그림 3.22 소자 용량 증가에 따른 필터 임피던스 변화 4 4
그림 3.23 입출력 임피던스 절대값 비교..... 4 5
그림 3.24 출력 임피던스 첨두치 분석 4 6
그림 3.25 설계 변경 후 입출력 임피던스 비교..... 4 7
그림 3.26 설계 변경 후 부하 급변시 배전 전압 변화 4 8
그림 4.1 계통 입력 사고 시 규정 경계선 5 0
그림 4.2 80% 계통 입력 및 회복 상황에서의 배전 전압 변화 5 2
그림 4.3 계통 사고 입력 전압 변화와 배전 라인 전압의 변화 5 3
그림 4.4 교류/직류 전력변환기의 입출력 전압 전달함수..... 5 5
그림 4.5 배전 전압 강하 과정..... 5 6
그림 4.6 캐패시터 용량 증가 후 배전 라인 전압 변화:..... 5 7
그림 4.7 Sag 상황에서 전류 reference 및 배전 전압 변화... 5 9
그림 4.8 입력 전압 변화에 대응할 수 있는 전류 reference 수정 방법 6 0
그림 4.9 전류 reference 수정 후 배전 전압 변화: (a) 적용 전 (b) 적용 후..... 6 1
그림 4.10 제시된 설계 기준이 적용된 모의 실험 결과 – 배전 라인 전압 변화..... 6 4

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 신재생 에너지 시스템에 대한 수요 증가와 함께 효율적인 전기 에너지 사용에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 또한 신재생 에너지를 보다 효율적으로 사용하기 위한 방편으로 건물의 배전 시스템을 직류 배전으로 변경하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 인터넷 데이터센터(IDC), 상업용 건물, 주거용 건물 등에 실증되고 있다[1,2].

직류 시스템에 대한 연구와 구축은 Micro-Grid 로 표현되는 수백 kW 단위의 시스템부터 수 kW 에 해당하는 주거용 건물까지 적용되어 시스템 효용성에 대한 검증이 진행되고 있다[3]. 이러한 시스템들은 태양광, 풍력 등의 다양한 신재생 에너지와 연동되어 분산 전원 시스템을 구성하게 된다.

직류 에너지를 발생시키는 신재생 에너지 발전의 특징으로 인하여, 기존 교류배전 시스템으로 분산 전원 시스템을 구성할 경우 각 분산전원의 전력변환기와 에너지 저장장치에서 추가적인 교류/직류 전력변환이 요구되어 에너지 변환 효율의 감소를 가져온다. 직류 배전 시스템은 분전반에 위치한 대용량 교류/직류 전력변환기를 사용하여 건물 내에 직류 에너지를 공급함으로써 분산 전원시스템과의 연결에서 에너지 변환단계가 감소하게 되고 이에 따른 효율의 상승을 꾀할 수 있어, 교류 배전 시스템에 비하여 분산전원 시스템 구성에 적합하다고 할 수 있다.

한편 교류/직류 전력변환기의 사용으로 인한 직류 배전라인의 출력 임피던스 상승 및 이로 인한 시스템 구성요소간의 간섭은 시스템의 안정성 문제를 야기하게 된다. 특히 다양한 타입 및 용량의 시스템 구성요소가 분산되어 연동되는 가정 및 사무용 빌딩의 경우 배전 라인에 의해 형성되는 라인 임피던스는 시스템의 불안정성을 야기 할 수 있다.

본 논문에서는 직류 배전 시스템을 구성함에 있어 발생 가능한 문제점들을 분류하고, 교류 배전시스템에 존재하는 규정과 동등한 수준의 전력 공급을 가능하게 하는 설계 방법들을 살펴본다. 또한 모의 실험을 통해 배전 시스템을 구성함에 있어 대용량 교류/직류 전력변환기와 부하 시스템을 구성하는 전력변환기에 대한 설계 기준에 대한 예시를 보이고, 시스템의 안정적인 동작을 확인한다. 제시된 설계 기준을 통해 시스템 설계자는 실제 구성에 앞서 분석을 통하여 직류 배전 시스템의 안정성을 확보 할 수 있다.

모의 실험에서는 발생 가능한 문제 상황을 적용하여 시스템 동작에 미치는 영향을 예측하고 제시된 설계기준에 의해 시스템이 안정적으로 동작하는지 확인한다. 이를 위하여 입력단 전력변환기와 배전라인, 부하 시스템의 등가모델을 구성하여 적용하고, 이를 통해 직류 배전 시스템의 직류단 배전 전압을 관찰하여 시스템 동작의 안정성을 확인 하였다. 또한 모의 실험을 위해 구성된 직류 배전 시스템의 예시에 대하여 각 설계기준을 만족시키는 소자 용량, 제어 성능 정도에 대하여 기술하였다.

본 논문에서 분석한 문제상황 분석과 설계 기준 제시는 앞으로 다양하게 구성될 직류 배전 시스템의 설계에 도움이 될 것으로 기대된다.

1.2 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 직류 배전 시스템의 일반적인 구조적 특징에 대하여 살펴보고, 배전 전압을 불안정하게 만드는 요인을 살펴본다. 3 장에서는 부하 시스템에서 일어나는 사고 상황과 시스템 간섭이 직류 배전라인에 미치는 영향을 모의 실험을 통해 관찰한다. 이를 통하여 전체 시스템이 안정하게 동작 할 수 있는 설계 기준을 살펴본다. 4 장에서는 계통 입력 변동에 따른 직류 배전 라인의 전압 불안정 현상에 대하여 살펴보고 문제 해결을 위한 설계 방법에 대하여 기술한다. 5 장에서는 내용을 요약 정리하고 결론을 맺는다.

제 2 장 직류 배전 시스템의 특성 및 분석

2 장에서는 논문에서 사용된 직류 배전 시스템의 특징과 구성을 살펴보고, 배전 구조 변경에 의한 기존 교류 시스템과의 차이점에 대하여 살펴본다. 또한 직류단 전압의 불안정 요소들을 정의하고, 직류 배전 전압에 미치는 영향에 대하여 살펴본다.

2.1 직류 배전 시스템의 구성

교류 배전 시스템과 달리 직류 배전 시스템은 분전반에 교류/직류 전력변환기가 설치되어 건물 내부에 직류를 공급하는 구조를 가지도록 설계된다. 이러한 구조의 배전 시스템은 건물 내부에 공급되는 직류 전원으로 인해, 직류 부하의 경우 교류에서 직류로 변환하는 전력변환 단계가 생략되어 부하 자체의 전력 변환 효율에서 이득을 취할 수 있다[4].

그림 2.1 은 모터를 사용하는 교류 부하, TV 나 PC 와 같이 직류 전압을 사용하는 직류 부하 그리고 전열부하와 같이 저항성을 보이는 저항 부하들이 한가지의 배전 전압만을 이용하여 각 배전 시스템에 연결되는 구조를 나타내고 있다[4].

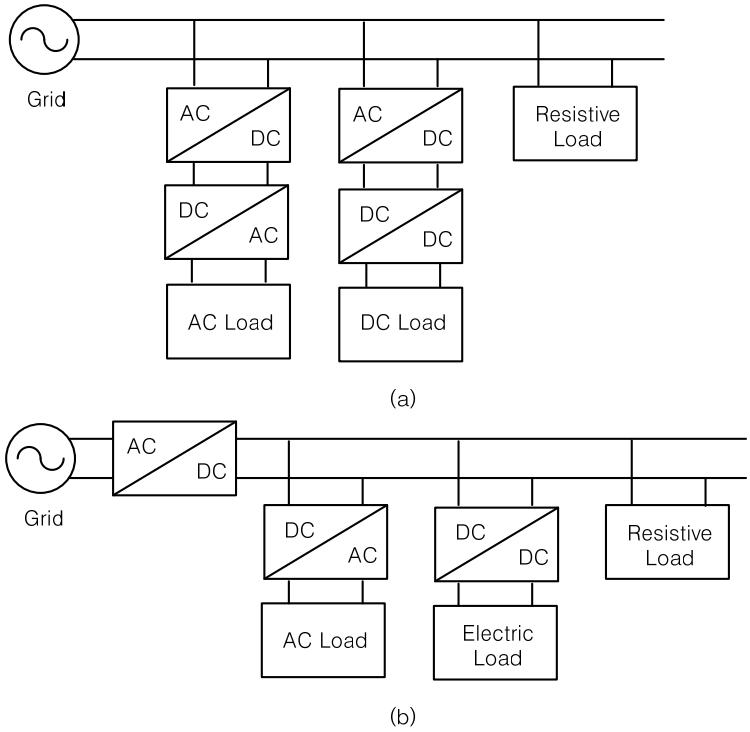

그림 2.1 배전 시스템의 연결 구조: (a) 교류 시스템, (b) 직류 시스템

2.1(b)의 구조는 동일한 부하 구성에서 개별 시스템에 존재하는 교류/직류 전력변환기들을 하나의 대용량 전력변환기로 대체하여, 직류 인터페이스에서 얻는 효율 이득을 증가시켜 교류 배전에 대해 우수한 성능을 가지는 것을 보이기 위하여 실제 실험에 사용되었던 구조이다.

전력변환 단계의 감소와 같은 직류 배전의 특징은 신재생 에너지가 연결된 시스템에 적용되었을 때 직류를 사용하는 부하에 있어 더 큰 효율 증가를 얻을 수 있다. 태양광, 풍력과 같은 분산전원이 연결된 시스템은 사용자가 에너지의 발생량을 제어할 수 없기 때문에 그림 2.2 과 같이 에너지 생산량과 부하 사용량간에 차이가 발생하게 된다.

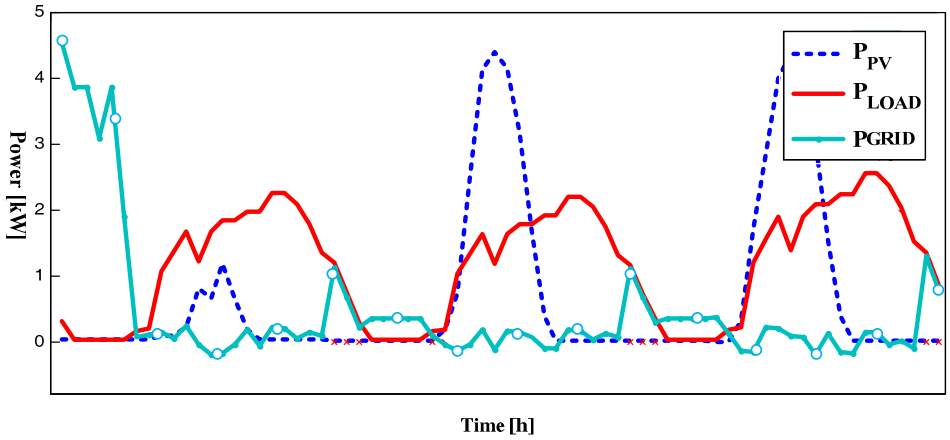

그림 2.2 신재생 에너지 발전과 부하 사용량 프로파일

그림 2.2 에 제시된 사용전력과 공급 전력의 관계를 살펴보면 부하사용량에 비해 초과 생산된 에너지를 저장하고, 분산전원의 에너지 발전이 부족한 시점에서 효율적으로 전력을 공급하기 위해서는 에너지 저장장치를 사용하여 잉여 전력을 저장하고 필요한 시점에 방전하여 부하에 전력을 공급하는 관리체계가 요구된다[5].

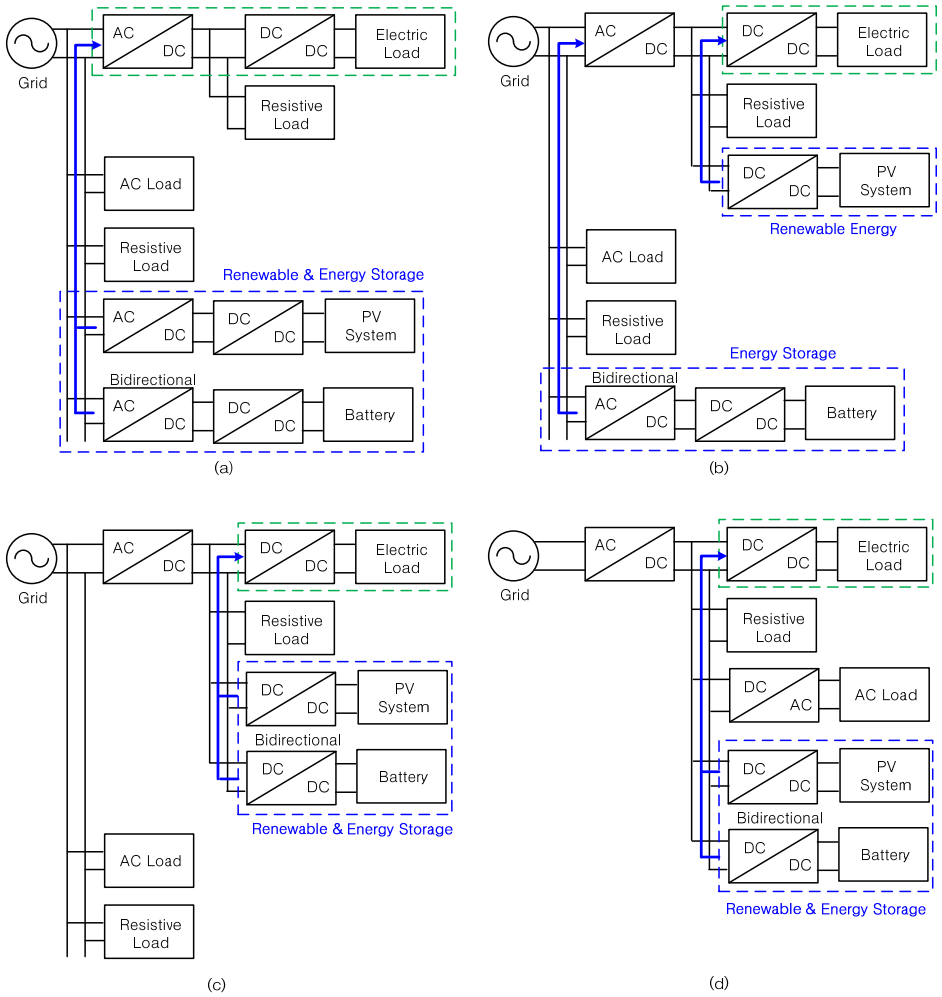

그림 2.3 직류 배전 시스템의 분산 전원 및 배터리 연결 구조

그림 2.3 에는 신재생 에너지와 에너지 저장장치를 이용하는 직류 배전 시스템의 다양한 구조와, 각 구조에서 분산전원과 에너지 저장장치로부터 직류 부하로의 전력을 전달하는 경로를 나타내었다. 이는 직류에너지가 직류 부하로 공급되는 과정으로, 교류 배전 시스템과 비교하여 효율 향상을 얻을 수 있는 직류 인터페이스이다.

신재생 에너지에서 생산되는 전력은 직류 에너지로 발전되기 때문에, 직류 배전에서는 그 에너지를 저장 및 사용하는데 있어 전력변환 단계가 줄어들게 되어 기존 교류배전 시스템과 비교하여 전력변환 과정에서의 손실이 줄어들게 된다. 그림 2.4 를 살펴보면 분산 전원에서 생산된 전력이 배전라인을 통해 다시 에너지 저장장치에 전달되기까지 거쳐야 하는 전력변환 단계가 그림 2.3 의 (c), (d)의 구조를 가지는 직류 배전의 경우 교류 배전 대비 절반으로 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

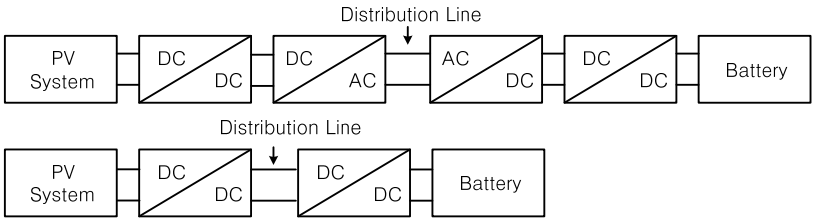

그림 2.4 교류 배전 시스템(위)과 직류 배전시스템(아래)의 신재생에너지 및 배터리 에너지 전달 구조

그러나 위와 같이 직류 배전 시스템을 구성하게 될 경우 교류배전과 비교하여, 문제점이 발생하게 된다. 직류 배전 시스템은 분전반에 위치하는 대용량 교류/직류 전력변환기로 인하여, 부하에서 바라보는 배전라인의 임피던스가 전력변환기의 출력 임피던스에 영향을 받게 된다.

기존 교류배전 시스템은 배전 라인에 별도의 전력 변환기가 존재하지 않아 도선의 임피던스를 무시했을 때 출력 임피던스를 매우 작다고 가정할 수 있지만, 직류 배전의 경우 전력변환기의 출력 임피던스로 인하여 배전라인의 출력 임피던스가 증가한다[6].

직류배전 시스템의 분전반에 설치되는 전력변환기를 등가 회로로 표현했을 때 다음 그림 2.5 와 같이 등가 인덕턴스 (L_e)와 캐패시턴스 (C) 그리고 입출력 전압 전달함수로 나타낼 수 있다.

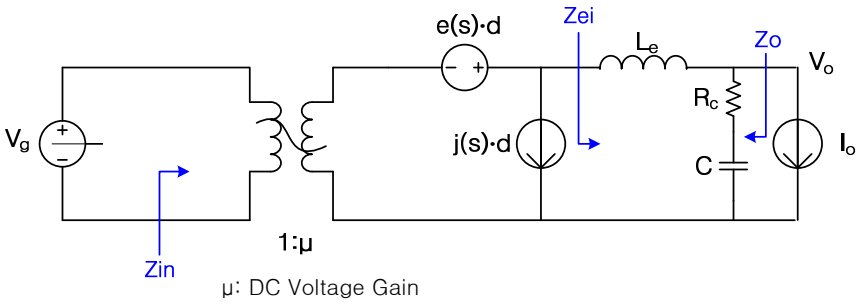

그림 2.5 PFC 등가회로

그림 2.5 에서 출력 임피던스 Z_o 는 식 2.1 과 같이 나타낼 수 있으며, 식에 사용된 ω_o, Q 는 각각 등가 Corner Frequency, Quality Factor 를 의미한다.

$$Z_o = sLe \,\|\, (Rc + \frac{1}{sC}) = \frac{sLe(1 + s/\omega_1)}{1 + s/\omega_o Q + s^2/\omega_o^2} \tag{2.1}$$

$$w_1 = \frac{1}{RcC}, \quad w_o = \frac{1}{\sqrt{L_e C}}, \quad Q = \frac{1}{Rc}\sqrt{\frac{C}{L_e}} \tag{2.2}$$

배전라인의 도선을 이상적이라고 가정했을 때 부하에서 바라본 전원측 전력 변환기의 출력 임피던스는 출력 필터를 구성하는 인덕턴스와 캐패시턴스의 함수가 되며 그림 2.6 과 같이 나타낼 수 있다.

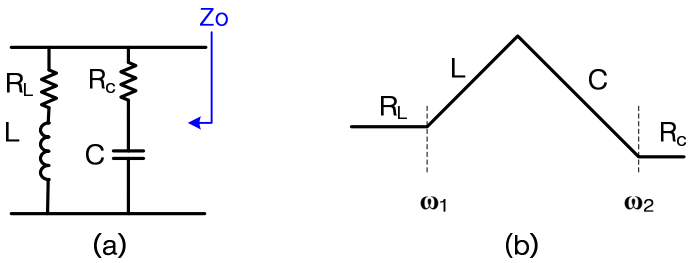

그림 2.6 배전라인의 등가 출력 임피던스 구성:
(a) 등가회로 (b) 임피던스 Bode plot

출력전압 변동을 줄여 양질의 직류 전원을 공급하기 위해서 출력 캐패시터를 매우 크게 설계 할 경우, 출력 임피던스는 매우 작아지게 되고 배전 라인의 출력 변동 폭이 줄어 들어, 이상적인 배전 라인과 같이 동작하게 된다. 하지만 출력 필터에 사용되는 캐패시터의 용량이 커질 경우, 용량 증가에 따른 비용 증가와 함께 전해 캐패시터의 사용으로 인한 수명 단축 문제 그리고 동적 특성이 느려지는 문제를 가져오게 된다. 따라서 전력변환기의 출력 캐패시터는 이러한 용량 제한으로 인해 출력 전압 변동 폭을 일정 수준 이하로 유지할 수 있는 최소값으로 설계된다.

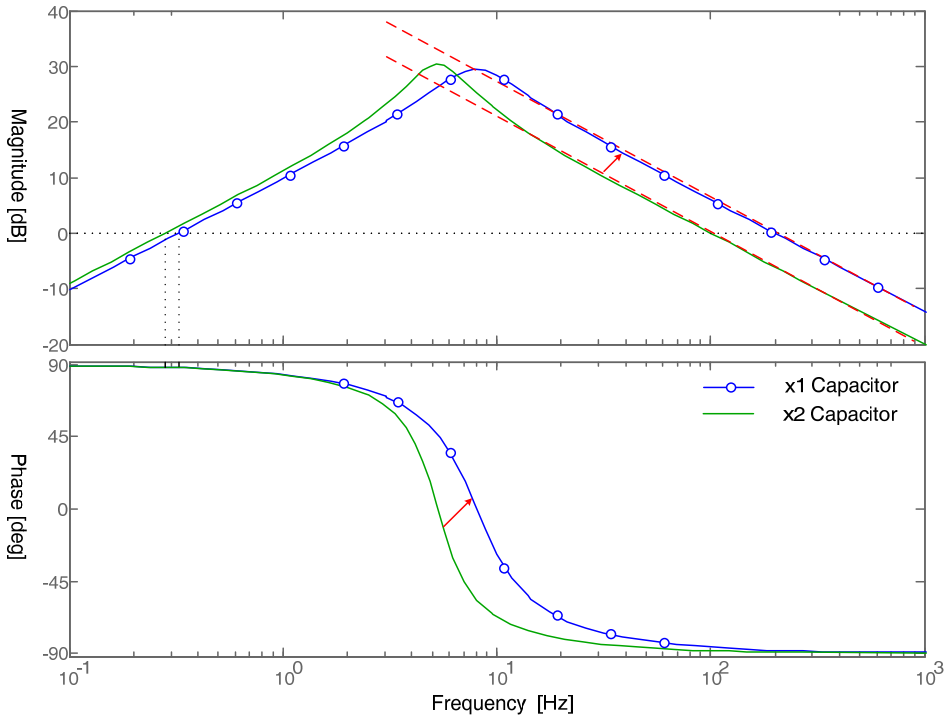

그림 2.7 출력 캐패시터 변화에 따른 출력 임피던스 변화

이러한 캐패시터의 용량 제한으로 직류 배전 시스템의 배전 라인 임피던스가 그림 2.7 과 같이 상대적으로 증가하였을 경우 Loading Effect 문제가 발생할 수 있다. 여러 개의 부하 시스템들을 등가로 나타내었을 때, 전체 시스템은 그림 2.8 과 같이 전원을 공급해주는 소스 전력변환기(Pre-Regulator)와 직렬 연결된 부하 시스템(Load Converter)으로 등가화 하여 나타낼 수 있다.

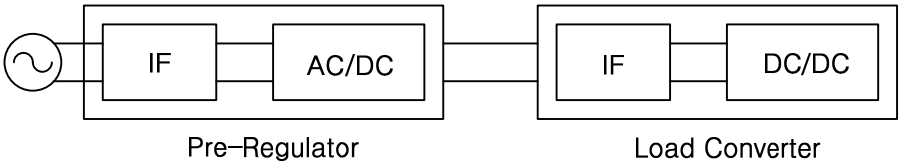

그림 2.8 직렬 연결된 두 시스템의 개념도

이상적인 경우 0 에 가까운 배전 라인의 출력 임피던스와 무한대로 보이는 부하의 입력 임피던스에 의해, 전원에서 부하로 전력 전달비는 1 에 가까워 진다. 그러나 실제 구성에서 두 전력변환기의 입·출력 임피던스는 유한한 값을 가지게 되며, 입·출력 임피던스 관계는 전력 전달비 변화를 야기하여 입·출력 임피던스의 상호작용은 시스템의 동특성에 영향을 미친다.

상호작용(Interaction) 발생시 전원의 흔들림이나 부하 급변으로 발생한 전압 불안정의 문제가 직류 배전 라인을 통해 상대적으로 크게 반영되어, 전체 시스템의 안정성에 영향을 주게 되어 설계자가 시스템 구성에 고려해야 하는 문제 요소가 된다[7,8,9].

위에서 언급한 내용과 같이 출력 임피던스가 증가하는 상황에서 다수의 부하가 병렬 연결되어 입력 임피던스가 감소하고 배전라인의 전압이 다른 전압 변동요인에 의해 불안정하게 흔들리게 되는 경우, 직류 배전 전압이 상승하여 시스템을 구성하는 스위치 소자에 영향을 주거나, 전압이 감소하여 입력 전압 허용 범위를 벗어나 연결된 부하 시스템의 동작이 멈출 수 있다. 따라서 직류 배전 시스템을 설계 함에 있어 직류단 전압이 흔들리게 되는 요인과 변화의 정도를 확인하고 설계에 반영하는 과정이 요구된다.

2.2 직류단 전압 변동의 원인 분석

이번 절에서는 직류 배전라인의 직류 전압을 불안정하게 만드는 요소를 정의하고, 각 요소가 배전 전압에 미치는 영향에 대하여 분석한다.

2.2.1 계통 전원 불안정으로 인한 전압변동

직류단 배전 전압에 영향을 주는 전압 불안정 요소로 계통에서 공급되는 입력 전원의 사고를 생각 할 수 있다. 계통 전압이 일시적으로 감소하거나(Sag) 증가하는 경우(Swell)와 순간적인 단락 사고(Fault)에 의하여 건물에 공급되는 교류 전압이 흔들릴 수 있다. 이 경우 교류/직류 전력변환기를 통하여 배전 전압에 그 영향이 나타나게 되고, 그 정도에 따라 시스템을 차단해야 할지, 또는 계속 운영을 할지 결정하게 된다.

전원전압 공급이 일시적으로 중단되었을 때 짧은 시간 내에 회복 되지 않는다면 배전 시스템은 작동을 멈추거나 에너지 저장장치와 신재생 에너지에서 공급되는 에너지를 사용하여 시스템 동작을 유지하게 된다[11,12].

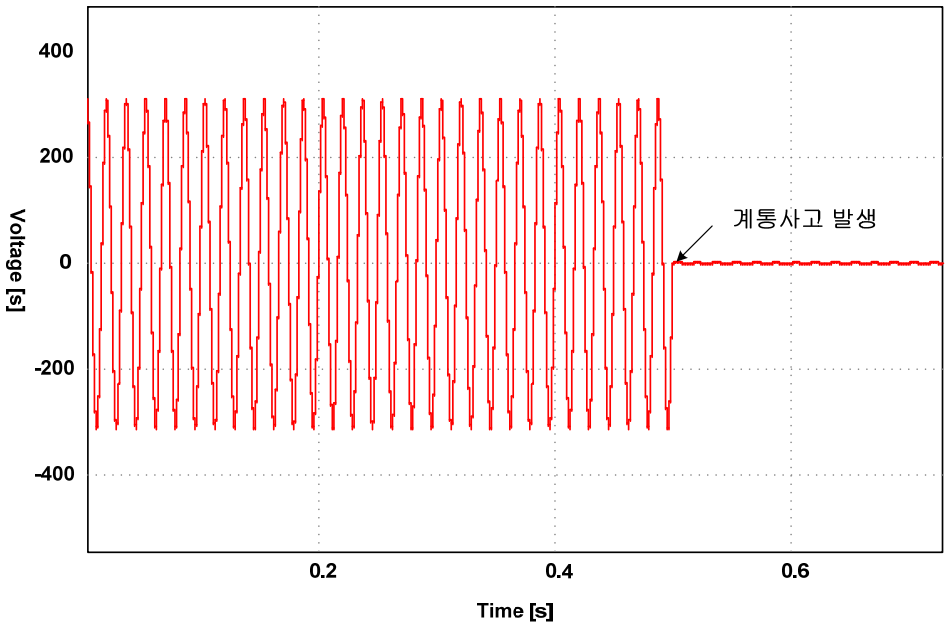

그림 2.9 계통 사고 상황의 입력 전압

그림 2.9 와 같이 계통에서 사고가 발생하여 시스템에 전원을 공급해주지 못하는 상황이 발생하였을 때, 부하에 전원을 공급하는 전력변환기들은 부하가 안전하게 종료될 수 있는 최소한의 시간까지 동작을 유지하여야 한다. 여기서 시스템이 종료되기 전까지 동작을 유지하도록 요구되는 시간을 Hold-up Time 이라고 한다.

기존 교류 배전 시스템에서는 이 Hold-up Time 규정에 의해 160ms 의 계통 입력 차단 상황에서 시스템이 안정적으로 종료되도록 설계 기준이 정해진다[12]. 직류 배전 시스템에서는 아직 건물의 배전 설계에 있어 해당 규정이 정해져 있지 않으므로, 본 논문에서는 교류 배전 시스템의 사고상황과 동일한 규정을 적용하였다.

전원이 완전히 차단되는 경우를 제외하고 입력 교류 전압의 순간적인 증가나 감소가 일어난 후 회복되는 경우 시스템은 계속해서 동작을 유지하여 시스템의 신뢰성을 확보해야 한다. 그림 2.10 과 같이 입력 전압이 감소하고 복구되는 시점에 나타난 입력 전압의 변동은 직류 배전 전압이 일시적으로 변화시키므로, 그 변화 정도가 시스템 동작에 영향을 주지 않게 하는 설계가 요구된다.

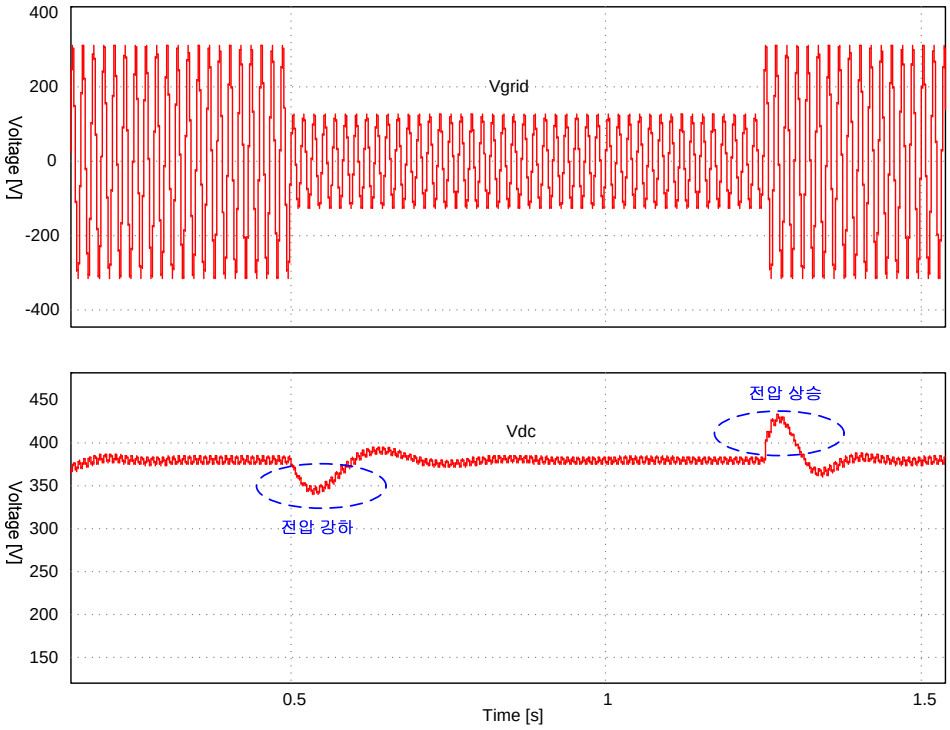

그림 2.10 계통 순시 전압 강하에 따른 배전 라인 전압 변화

2.2.2 부하단 사고 상황으로 인한 전압변동

직류 배전 라인의 전압 변동을 일으키는 두 번째 요소로, 직렬 연결된 시스템 중 부하 쪽에서 발생하는 사고를 생각 할 수 있다. 소스 전력 변환기와 부하 전력변환기가 직렬 연결된 시스템은 다음 그림 2.11 과 같이 표현 할 수 있다. 이와 같은 구조에서 배전 라인의 한 부분이 단락되어 사고가 발생할 경우 배전 라인을 통하여 다른 부하 시스템들의 입력에 영향을 주게 된다.

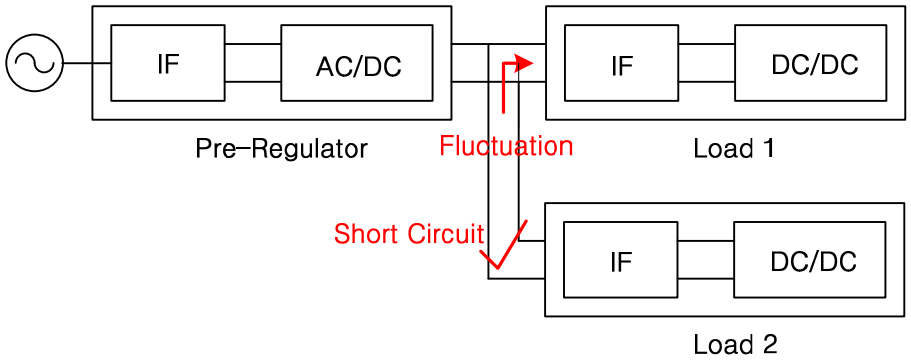

그림 2.11 병렬 연결된 부하 시스템간의 사고 상황 및 전달 방향

단락 사고가 발생한 경우 단락이 발생한 경로의 낮은 임피던스로 인하여 과전류가 흐르게 된다. 급격히 증가한 단락 전류가 차단회로의 동작으로 감소될 때까지 그림 2.12 와 같은 배전 전압 변동이 나타나게 된다.

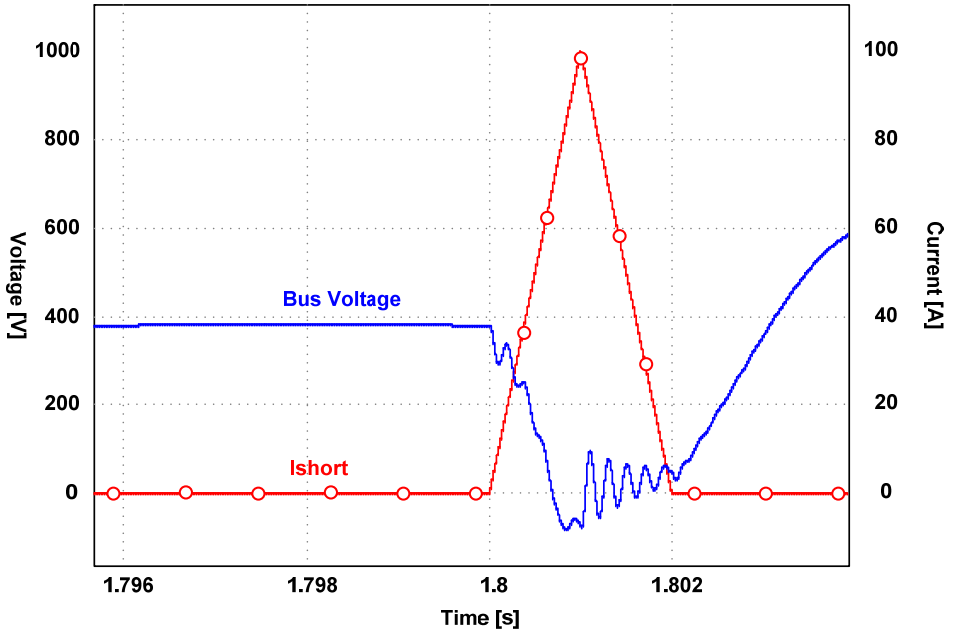

그림 2.12 부하 사고 상황 시 단락 전류와 배전 전압의 관계

단락 사고 상황은 배전 전압의 급격한 감소를 야기하여 다른 부하 시스템이 종료되는 결과를 가져 올 수 있다. 그림 2.12 의 부하 사고상황에서 직류 배전 전압을 살펴보면, 단락이 발생하여 단락 전류가 급격히 증가하고 배전 전압이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

일반적인 시스템 구성에서는 사고 상황에 대비하여 개별 시스템과 전체 시스템에 퓨즈 또는 차단기를 설치하여 빠른 시간 안에 문제가 되는 시스템을 차단하는 설계를 선택하게 된다. 그러나 사고 상황이 해소되더라도 회복이 되는 과정에서 배전 전압의 Overshoot 발생에 의해 캐패시터, 반도체 소자등 시스템 구성요소가 과전압에 의해 파괴될 수 있다.

회복과정에 대한 설계가 결여된 시스템의 예시를 살펴보면 그림 2.13 과 같이 배전라인의 전압 강하가 부하 시스템의 입력전압 범위를 벗어나는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 사고 상황에 대한 설계 기준의 필요성을 확인 할 수 있다.

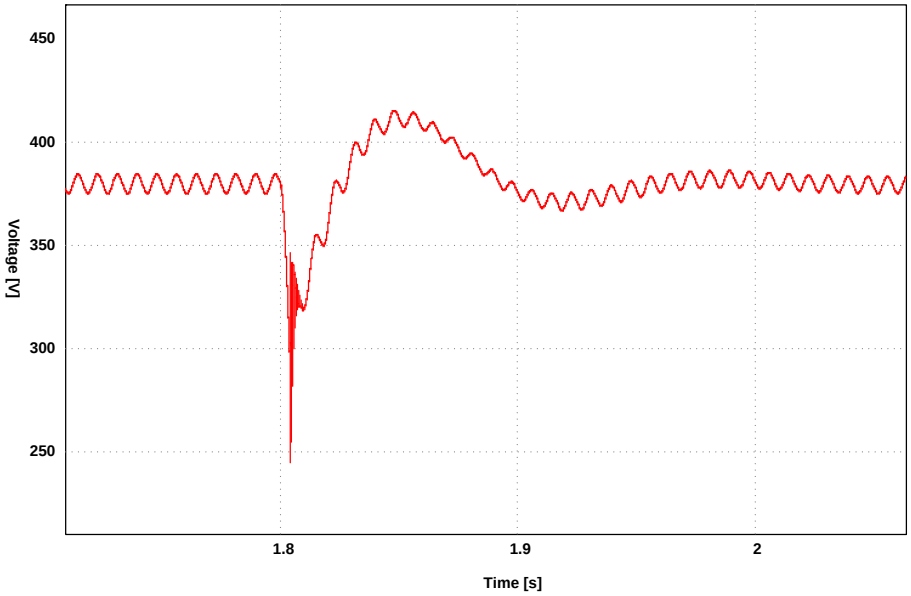

그림 2.13 부하 사고 상황 및 퓨즈 차단에 의한 배전 전압 변동

2.2.3 부하 변동으로 인한 전압 변동

직류단의 전압 불안정을 일으키는 세 번째 원인으로 급작스러운 부하량의 변화를 생각할 수 있다. 부하량 변화는 주로 부하 시스템의 초기 구동이나 동작 모드 변화에 의해 발생하게 되며, 순간적으로 많은 전력을 요구하여 배전전압이 일시적으로 감소하는 상황을 가져온다.

앞 절에서 설명 한 것과 같이 직류 배전 시스템에서는 대용량 교류/직류 전력변환기의 출력 임피던스가 배전 라인의 임피던스로 나타난다. 또한 돌입 전류 등의 문제를 피하기 위하여 출력 캐패시터의 크기가 제한됨에 따라 출력 임피던스의 크기가 증가하여 교류 배전 시스템에 비해 배전 라인의 임피던스가 상대적으로 큰 값을 가진다.

교류 배전 시스템에 비해 상대적으로 증가한 직류 배전 시스템의 배전 라인 출력 임피던스는, 병렬로 추가되는 부하 시스템들로 인해 입력 임피던스가 감소함에 따라 두 임피던스 간의 차이가 줄어들면서 Loading Effect 가 발생하고, 두 임피던스의 크기가 역전 되는 Impedance Interaction 이 일어났을 때 전체 시스템의 안정성을 보장할 수 없게 된다[7,9,10].

이러한 상황에서 모터 부하와 같은 대용량 부하의 변화가 일어날 경우 직류 배전 시스템은 사고 발생 가능성을 가진다. 그림 2.14 는 대용량 부하의 부하량 변화가 일어 났을 때 배전 전압의 변화를 살펴본 모의실험 결과이다.

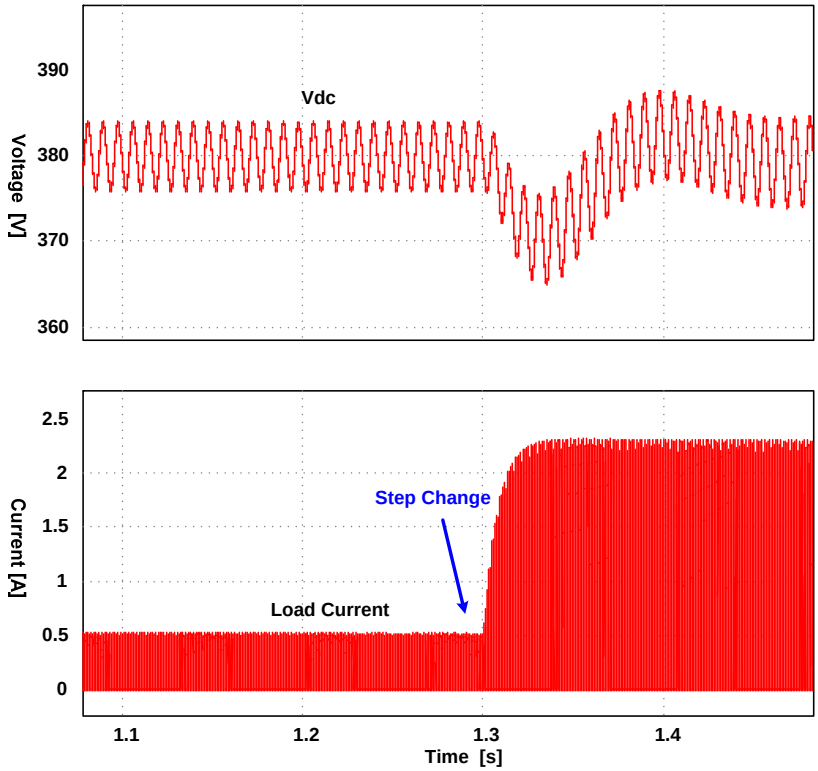

그림 2.14 대용량 부하의 부하량 변화와 직류 배전 전압 변화

위와 같은 상황에서 직류 배전 시스템이 안정적으로 배전 전압을 유지하기 위해서는 부하량 급변에 대처할 수 있는 전력변환기의 동적인 특성 향상과, 이상적인 배전 라인에 가까운 임피던스 특성이 요구된다고 볼 수 있다.

제 3 장 부하 시스템 사고 및 부하 변동 분석

3 장에서는 부하 시스템에서 일어나는 전압 불안정 요소에 의해 직류단 전압이 흔들리는 상황을 모델링하고 분석한다. 또한 각 상황에 맞는 설계 기준을 제시하여 시스템의 안정성을 보장 할 수 있는 설계 가이드를 제시한다. 3.1 절과 3.2 절은 각각 부하 시스템의 사고 상황에 대한 모델링과 해결 방법에 대하여 기술하고 3.3 절과 3.4 절은 부하량이 급변하는 상황에서 시스템 안정성을 분석하고 안정성 보장을 위한 설계 요소를 확인한다. 3.5 절에서는 분석 내용 및 설계 가이드를 종합하고 정리한다.

3.1 부하 사고에 의한 전압 변동 관찰

부하에 의한 배전 전압 변동 상황 중 2.2.2 절에서 언급한 개별 부하 시스템에서 일어나는 사고 상황을 분석하기 위하여 그림 3.1 과 같은 시스템 구조가 고려되었다. 모의 실험에 고려된 회로는 계통 입력과 직류 배전 라인 사이에 위치한 1 개의 전력변환기와 2 개의 부하 시스템, 배전 라인 모델로 구성되었다. 사고 상황에서 시스템 차단 기능은 퓨즈를 모델링하여 구현하였다[16,17].

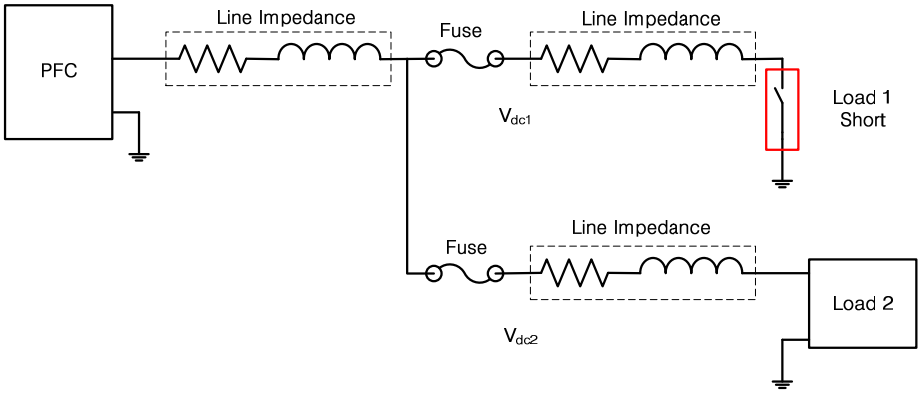

그림 3.1 시스템 연결 및 부하 시스템의 사고 상황 발생 구조

시스템간의 배전라인의 길이는 20m 로 설계 하였으며, IEC 60228 에 분류된 두께 13.3mm^2 의 표준 도선을 사용한다고 가정하였다[18]. 또한 배전 라인의 임피던스는 다음 식 3.1 과 3.2 를 통하여 각각 0.3Ω의 등가저항과 40uH 의 인덕턴스로 모델링 하였다[18]. 식 3.1 의 len 과 d 는 도선의 길이와, 지름이다.

$$L = 0.2len(\ln(\frac{4len}{d}) - 0.75) \tag{3.1}$$

$$R = 0.013\Omega / m \tag{3.2}$$

모의 실험에서는 부하 1 에서 단락 사고가 발생하였을 때, 부하 2 에 연결되어 있는 배전라인의 직류 전압을 관찰하고 부하 2 가 정상적으로 동작 할 수 없는 영역의 배전 전압(V_{dc2})이 발생하는지 관찰하였다. 부하의 사고 상황에서 단락 전류는 100A 의 최대치를 갖도록 설계 하였으며, 퓨즈는 40A 이상의 전류가 흘렀을 때 차단되도록 설계하였다.

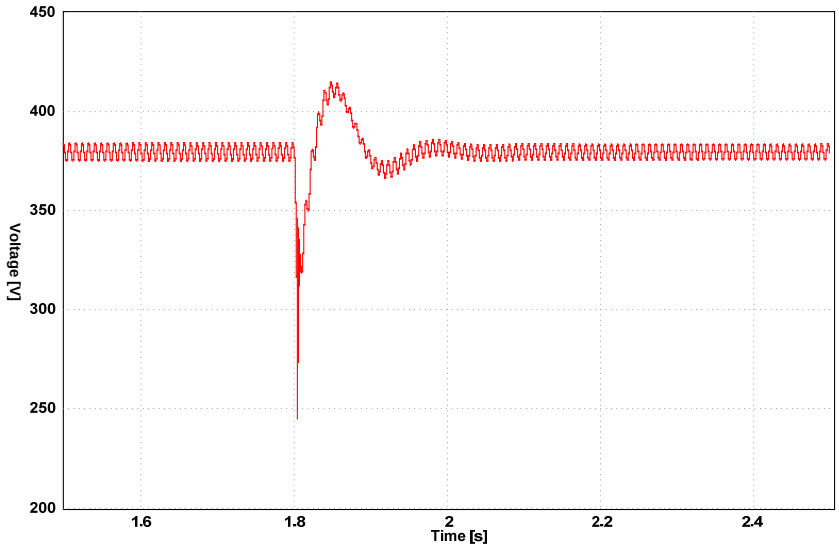

그림 3.2 부하1의 사고 발생시 부하2 연결 배전 전압 변화

그림 3.2 의 단락 사고시의 모의 실험 결과를 살펴보면 부하 2 가 연결된 배전 라인의 전압이 250V 부근까지 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 직류 배전 시스템을 설계하는 과정에서 배전라인의 전압 변동폭을 제한하고 부하 시스템의 입력 전압 범위 또한 동일한 기준에서 설계 되었을 때, 위와 같은 배전전압 강하는 부하 시스템이 종료되거나 고장을 일으키는 결과를 낳을 수 있다. 따라서 부하에서 발생하는 사고 상황에 대하여 배전 전압 변동을 제한할 수 있는 설계 기준이 요구됨을 알 수 있다.

3.2 사고 차단 및 전압 안정화 방법

3.2 절에서는 3.1 절에서 관찰된 배전 전압의 변동을 제한하기 위하여, 단락 전류와 배전 전압의 관계를 해석해 본다. 직류 배전시스템에서는 소스 전력변환기와 배전라인을 통하여, 부하 시스템에 전력이 공급된다. 소스 전력변환기는 높은 인덕턴스를 가지도록 설계되기 때문에 입력 전류원으로 표현 할 수 있다. 또한 단락사고는 과전류가 흐르는 상황으로 볼 수 있기 때문에, 전류원으로 대체할 수 있다.

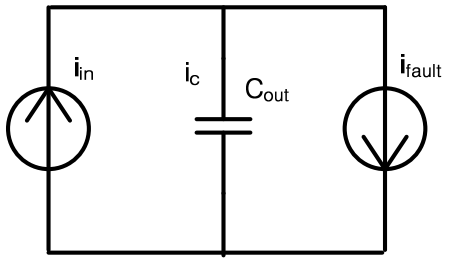

그림 3.3 사고 상황에서 전류 흐름

$$i_{in}(t) + i_c(t) = i_{fault}(t) \tag{3.3}$$

단락 전류는 2.2.2 절에서 언급한 것과 같이 단락 경로의 임피던스 감소로 인하여 흐르는 전류의 크기가 순간적으로 큰 값을 가지기 때문에, 모의 실험에서는 다른 부하에서 사용하는 전류에 비해 상대적으로 큰 값을 가진다고 가정하였다. 진행된 모의 실험에서 단락전류의 크기는 100A 의 값이 사용되었으며, 이때 배전 라인을 통해 두 번째 부하로 0.4A 의 전류가 흐르도록 하였다.

3.3 의 모델에서 단락 전류 증가에 따른 배전전압의 변화는 출력 캐패시터의 양단 전압 변화량으로 볼 수 있다. 캐패시터의 전압, 전류 관계에서 캐패시터의 양단 전압 변화는 식 3.5 와 같이 나타낼 수 있다.

$$C\frac{dv_c(t)}{dt} = i_c(t) \tag{3.4}$$

$$\Delta v_c = \frac{1}{C}\int_{t_1}^{t_2} i_c(t)dt \tag{3.5}$$

식에 사용된 t_1, t_2, $v_c(t)$, $i_c(t)$는 각각 단락사고 발생시간, 단락사고 종료시간, 캐패시터의 양단 전압 그리고 캐패시터 전류이다. 식 3.5 를 통하여 배전 전압의 변화는 캐패시터의 용량과 사고시간 동안 단락 전류의 누적 합에 비례하는 것을 알 수 있다. 그림 3.5 는 출력단 캐패시터의 용량 증가에 따른 배전라인 전압 변화를 비교하여 확인한 결과로 캐패시터 용량의 증가에 따라 배전 전압 변동폭이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

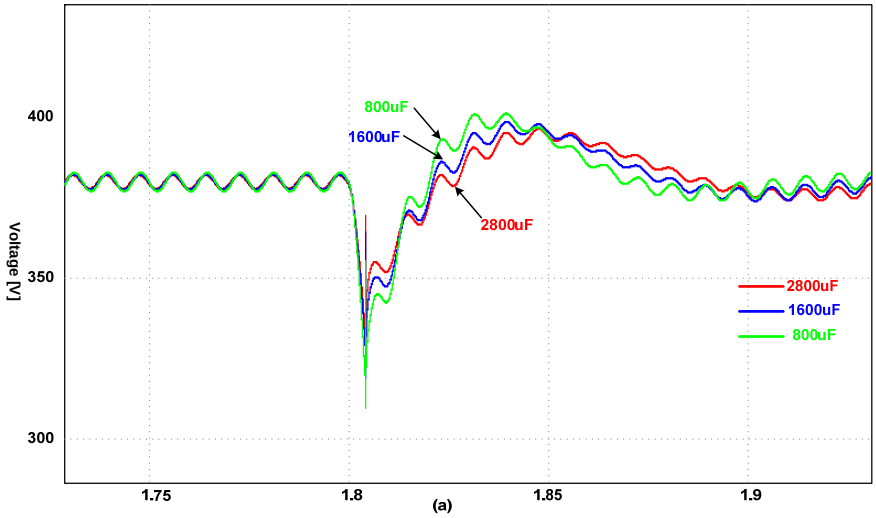

그림 3.4 캐패시터 용량 증가에 따른 배전 라인 전압 변화

배전 전압 변동을 제한하기 위하여 배전라인에 추가할 캐패시터의 용량은 식 3.4 의 단락 전류를 계산하여 얻을 수 있다. 단락 전류는 그림 3.5 와 같이 사고가 발생하여 전류가 증가하는 구간과 퓨즈가 끊어지면서 과전류가 차단되는 구간으로 나눌 수 있다[17].

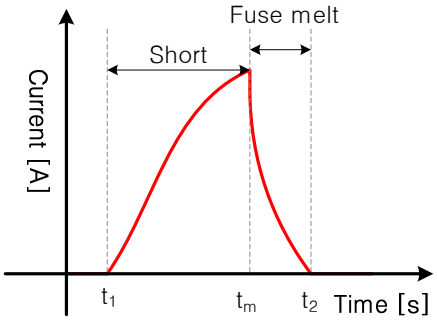

그림 3.5 단락 전류 파형

본 논문에서는 과전류의 파형을 다음과 같이 1 차 기울기를 갖는 형태로 간략화 하였다.

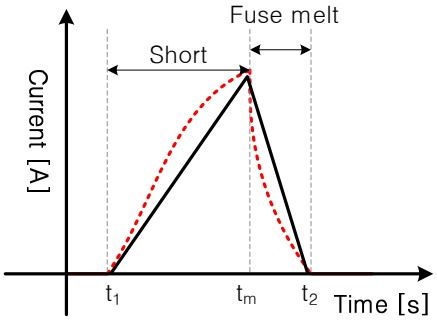

그림 3.6 간략화된 단락 전류 파형

간략화된 단락 전류를 사용하여 캐패시터의 출력 전압 즉, 배전 라인의 전압 변동 폭은 다음 식 3.6 와 같이 나타낼 수 있다. 식에 사용된 함수 i_{short} 와 i_{melt} 는 단락 전류가 상승하는 구간과 감소하는 구간의 함수이다. t_m 은 퓨즈가 차단을 시작하는 시간을 나타낸다.

$$\Delta v_c = \frac{1}{C}\int_{t_1}^{t_2} i_c(t)dt = \left[i_{short}\right]_{t1}^{tm} + \left[i_{melt}\right]_{tm}^{t2} \tag{3.6}$$

식 3.6 를 이용하여 배전 전압 변동폭을 30V 이내로 유지하기 위한 설계 기준 예시를 정할 때, 출력단에 필요한 캐패시터의 용량은 3300uF 이 된다. 따라서 단락사고에서 배전 전압의 안정성을 보장하기 위해서는 PFC 의 출력에 사용된 캐패시터의 용량을 제외한 2500uF 의 캐패시터를 배전라인에 위치 시켜야 한다.

그림 3.1 의 구조에서 캐패시터가 연결 될 수 있는 위치는 그림 3.7 과 같이 분전반의 출력과 부하의 입력 부분을 생각 할 수 있다.

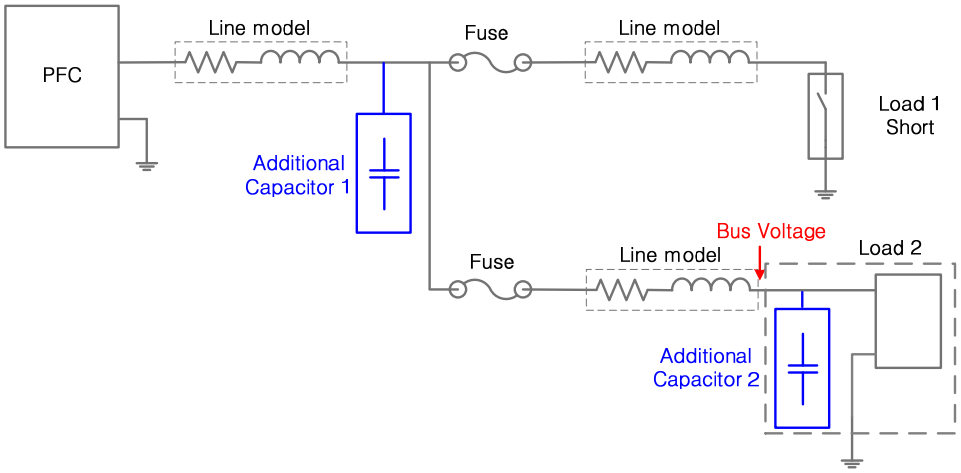

그림 3.7 전압 강하 해결을 위한 캐패시터 추가 위치

첫 번째 위치인 분전반의 출력의 경우 전력 전달 성능 향상과 배전라인 노이즈, 전압 Ripple 감소, EMI 억제를 위하여 배전라인 캐패시터가 사용되고 있다[19]. 반대로 부하 시스템에 위치시키는 경우는, EMI 억제를 위하여 부하 전력변환기의 앞에 추가하는 입력 필터의 캐패시터를 사용할 수 있다. 수 *uF* 의 용량을 가지도록 설계되는 부하 입력 필터의 캐패시터의 용량을 증가 시킬 경우, 개별 부하의 부피가 커지는 문제점이 발생하게 된다.

따라서 배전 전압 변동 억제를 위한 추가 캐패시터는 분전반의 출력에 대부분의 용량을 할당해야 함을 알 수 있다. 모의 실험에서는 분전반의 출력위치에 2500uF 의 캐패시터를 추가하여 그 결과를 살펴보았다.

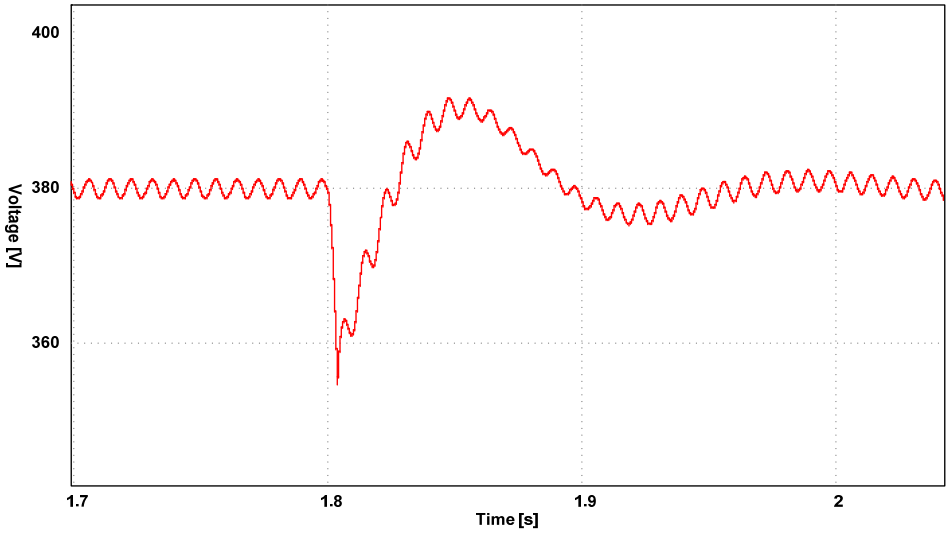

그림 3.8 조합된 캐패시터 용량 추가에 따른 배전 라인 전압 변화

그림 3.8 의 실험 결과를 살펴보면 사고 상황에서 배전 전압이 35V 정도 감소 후 회복되는 것을 확인 할 수 있다. 식 3.5 를 통해 계산된 30V 의 전압 감소 예상 치와 비교하여 근접한 결과를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 보다 더 정확한 예측을 위해서는 배전라인에 위치한 인덕턴스성분과 저항성분을 고려하는 과정이 필요할 것으로 생각된다.

3.3 불안정한 시스템 상황에서 부하량 변화

직류 배전 시스템은 분전반에 설치하는 교류/직류 전력변환기로 인하여 기존 교류 배전 시스템에 비해 출력 임피던스, 즉 배전라인의 임피던스가 증가하는 차이점을 가진다. 배전 라인의 임피던스가 이상적이지 못하고 그 크기가 증가하여 유한한 값을 가지게 되는 상황에서는, 상호 연결된 두 시스템의 전력 전달 구조에서 배전라인을 통해 배전 전압의 흔들림이 부하 시스템에 나타날 수 있다. 또한 증가된 출력 임피던스와 입력 임피던스의 상호 간섭으로 인해 부하 시스템과 연결된 부분에서 안정성 문제가 발생할 수 있다[20,21].

안정성 문제를 살펴보기 위하여 그림 3.9 와 같이 전력을 공급해주는 전압원과 그 출력 임피던스 Z_s, 부하 시스템의 입력 임피던스 Z_i 로 전력 전달 과정을 표현하였다.

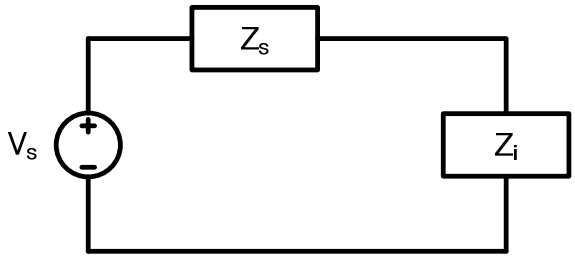

그림 3.9 입출력 임피던스와 전압 전달 관계

위와 같은 전력 전달 상황에서 전원에서 부하로의 전달함수는 다음 식 3.7 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_g}{V_s} = \frac{Z_i}{Z_s + Z_i} \tag{3.7}$$

식 3.7 의 전압 전달 함수에서 부하의 입력 임피던스는 그림 3.10 에서 확인 할 수 있듯이 음의 부호를 가진다.

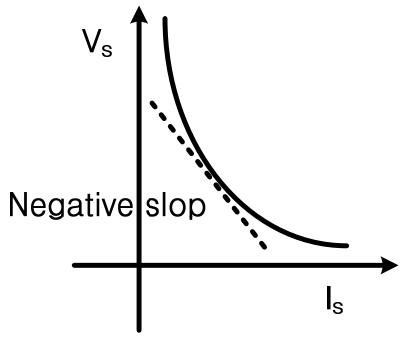

그림 3.10 부하 시스템의 임피던스 특성

배전라인의 임피던스가 0 에 가까운 이상적인 값을 가질 경우, 또는 부하 부하의 입력 임피던스 Z_i 가 출력 임피던스 Z_s 를 무시할 수 있을 정도로 매우 큰 값을 가질 경우, 식 3.7 의 전압 전달 비는 1 의 값을 가지고 Loading Effect 는 발생하지 않는다. 그러나 직류 배전 시스템처럼 출력 임피던스의 크기가 증가할 경우 전압 전달 비는 점점 떨어져 Loading Effect 가 발생하게 된다.

Loading Effect 발생에 의한 시스템으로의 영향을 살펴 보기 위하여, 다음 그림 3.11 와 같이 두 개의 Sub-system 이 연결된 구조를 살펴보았다[24].

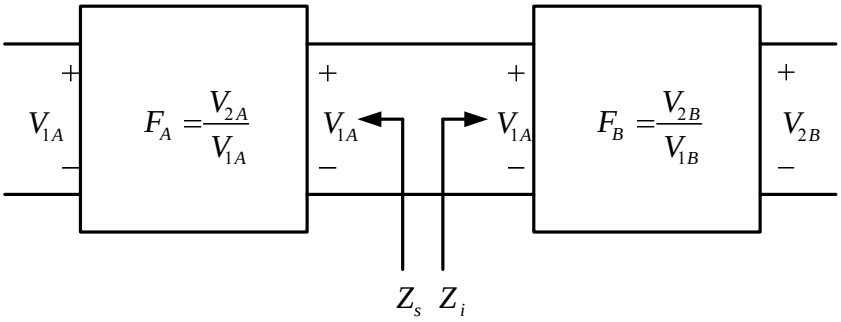

그림 3.11 직렬 연결된 Sub-system

그림 3.11 의 시스템은 두 개의 Sub-system 이 직렬로 연결되어 있고, 각각의 전력변환기를 통한 전압 전달비 F_A, F_B 를 가진다. 두 시스템이 연결된 곳에서 앞쪽의 Sub-system 이 가지는 출력 임피던스 Z_o 와 부하 시스템이 가지는 입력 임피던스 Z_{in} 에 의한 전달함수는 식 3.7 에서 다음 식 3.8 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_g}{V_s} = F_A F_B \frac{Z_i}{Z_s + Z_i} = \frac{H_s}{1 + Z_s / Z_i} \quad , \ (H_s = F_A F_B) \qquad (3.8)$$

직류 배전 시스템의 경우 Z_s 의 값이 점점 커져 분모항인 $1+{Z_s}/{Z_i}$ 의 값이 음의 값을 가지게 되면 시스템은 불안정한 영역으로 들어간다.

실제 직류 배전 시스템을 구성함에 있어서 출력 임피던스 증가에 의한 시스템 불안정 상황을 살펴 보기 위하여 그림 3.12 와 같은 직류 배전 시스템의 예시를 살펴 보았다.

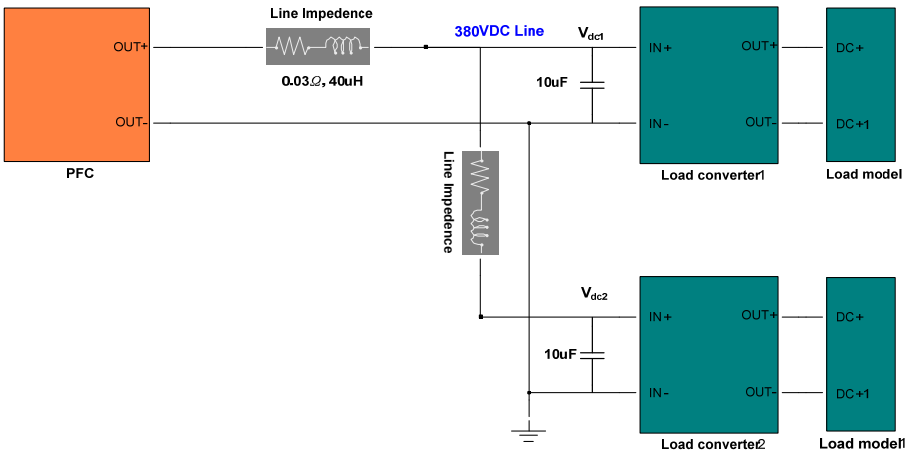

그림 3.12 모의 실험에 사용된 직류 배전 구조

위와 같이 부하가 배전라인에 병렬로 연결되는 경우 사용자가 부하 시스템을 추가할 때마다 등가 입력 임피던스가 감소하게 된다. 또한 분전반의 전력변환기로 인하여 배전라인의 출력 임피던스가 유한한 값을 가지게 되어 식 3.8 와 같이 임피던스 변화에 의한 불안정 문제가 발생할 수 있다.

그림 3.13 의 모의 실험에서는 PFC 회로의 출력 임피던스와 배전라인에 위치한 임피던스 성분에 의하여 임피던스가 겹치는 구간이 발생하는 것을

확인 할 수 있다. 그림 3.13 의 실험 상황에서는 그림 3.12 에 보인 것처럼 20m 의 도선에서 발생하는 40uH 의 인덕턴스와 0.03Ω의 저항, 노이즈 억제를 위해 설치된 10uF 의 배전 캐패시터, PFC 회로 그리고 2 개의 부하 전력변환기가 고려되었다.

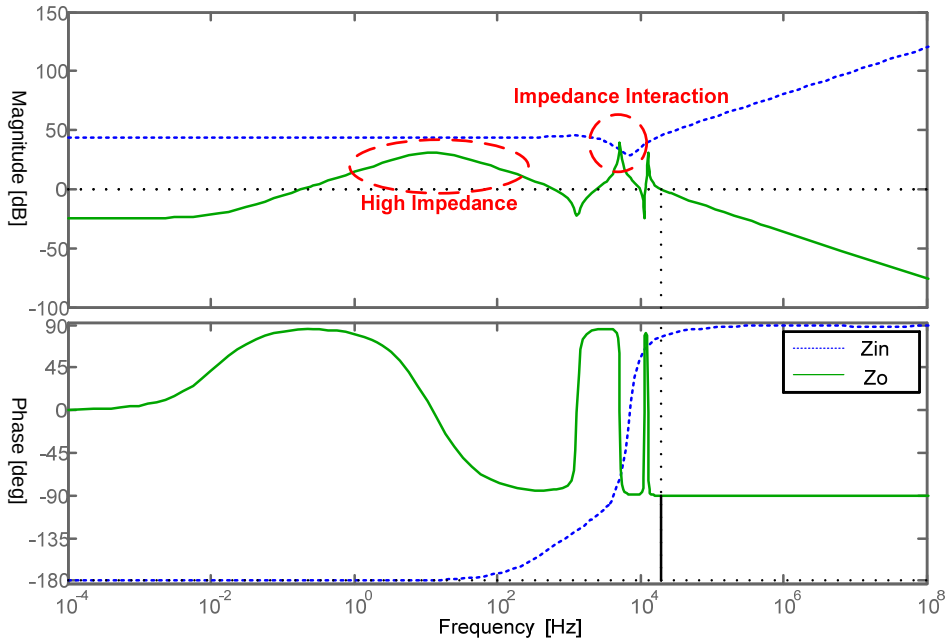

그림 3.13 주파수 분석 – Impedance Interaction

이와 같은 조건에서 부하의 앞에서 측정된 입·출력 임피던스의 차이가 충분하지 않아 PFC 의 출력 임피던스가 부하의 임피던스에 근접하고 있고, 배전라인의 인덕턴스와 캐패시턴스에 의해 수 kHz 의 영역에서 출력 임피던스가 입력 임피던스보다 큰 것을 확인 할 수 있다. 앞에서 설명한 것과 같이 이러한 임피던스 상호작용 상황에서 시스템의 동작은 불안정할 수 있다.

임피던스 문제가 발생했을 때 부하 변동이 시스템 동작에 미치는 영향을 살펴보기 위해 시간영역에서 시스템의 동작을 살펴 보았다.

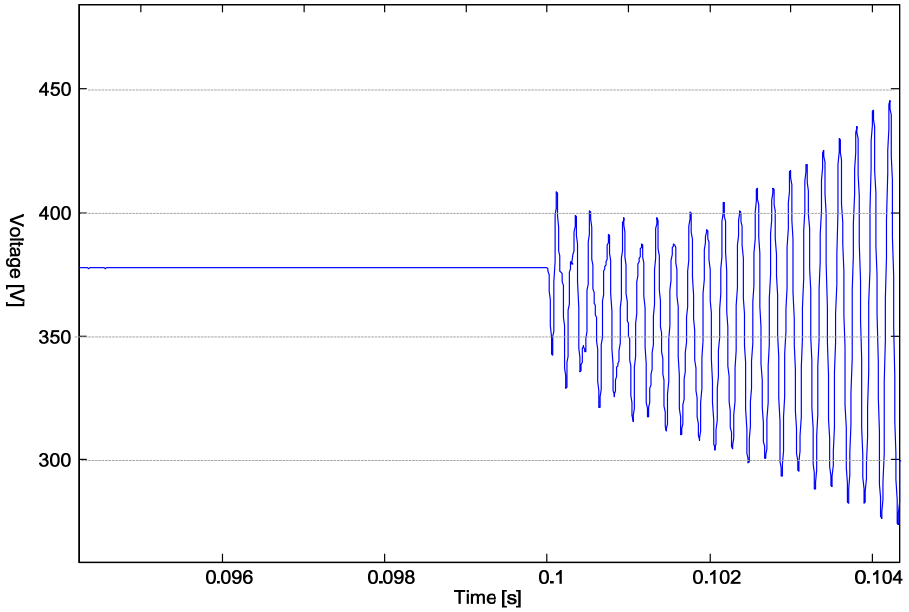

그림 3.14 불안정한 시스템의 배전 전압 변화

그림 3.14 의 실험 결과는 부하 1 의 부하량이 변하는 시점(증가)에 부하 2 에 연결된 배전 라인의 전압으로 부하량이 증가하는 0.1 초부터 배전전압(V_{dc2})이 흔들리면서 발산하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 임피던스 문제를 향상시키고 시스템의 불안정성을 해결 할 수 있는 설계가 요구됨을 알 수 있다.

3.4 임피던스 특성 향상 방법 및 안정화 방법

3.3 장에서 관찰된 불안정 상황을 해결 하기 위해서는, 부하 변동과 같은 상황에서 배전 라인을 통해 연결된 전체 시스템이 안정하도록 임피던스의 크기를 제한하는 과정이 요구된다. 시스템 안정을 위해서 부하의 입력 임피던스를 최대화하고, 배전라인의 출력 임피던스는 최소화 하는 방법이 필요하다[20,21,22].

먼저 PFC 의 출력 임피던스를 최소화 시키기 위하여 출력 임피던스의 최대값과 입력 임피던스의 최소값을 관찰해 보았다. 그림 3.13 의 임피던스를 확대한 그림 3.15 를 살펴보면 PFC 출력 임피던스의 최대값이 나타나는 낮은 주파수 영역에서 입력 임피던스가 높게 형성되어 있음을 확인 할 수 있다.

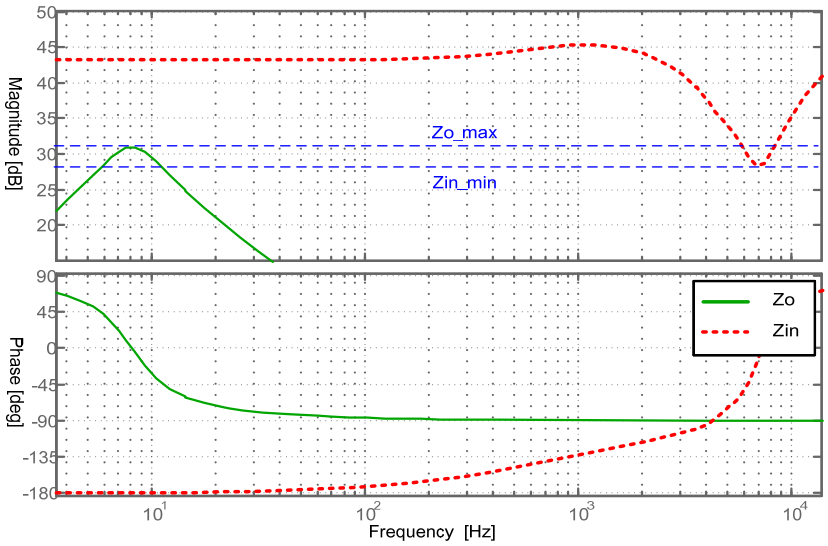

그림 3.15 부하, 전원 시스템의 임피던스 비교

그러나 부하의 입력에 추가하는 입력 필터의 성능에 따라 부하 시스템의 입력 임피던스는 다음 그림 3.15 와 같이 변화하며 PFC 의 출력 임피던스에 접근하게 된다[21,27].

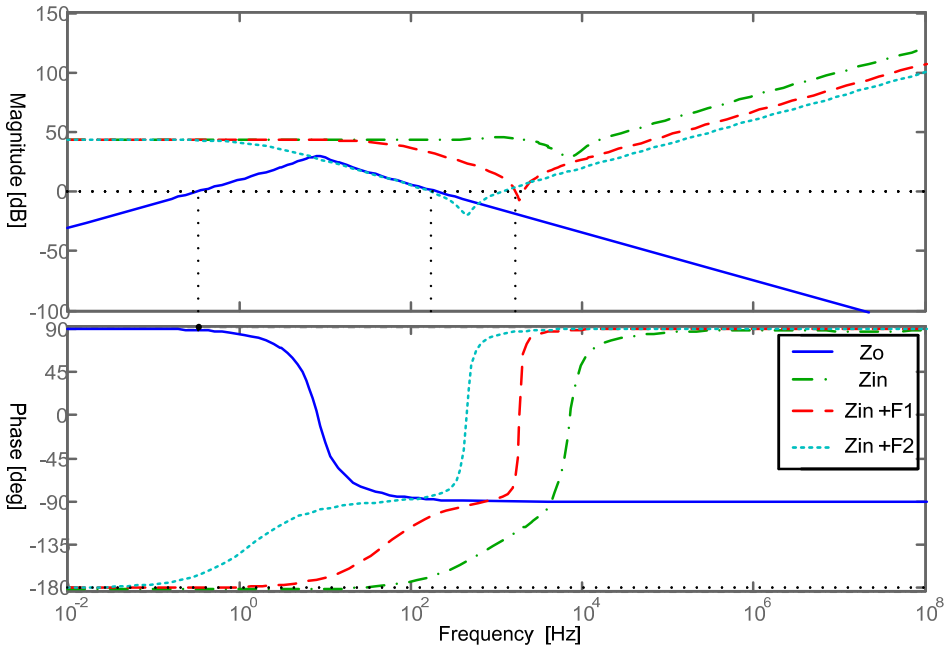

그림 3.16 입력필터 변화에 따른 입력 임피던스 변화

위와 같은 상황을 해결하기 위하여 입·출력 임피던스간에 일정한 Gain margin 을 두게 된다[8,10]. 일반적으로 6dB 의 Gain margin 이 요구되며 PFC 의 출력 임피던스 수정을 통해 충분한 Gain margin 을 확보하기 위해서 Feed-forward 기법을 적용하여 출력 임피던스를 감소 시킬 수 있다. 본 논문에서는 출력 전류 Feed-Forward 기법을 모의 실험에 적용하였다.

교류/직류 전력변환기에 적용된 Feed-Forward 는 다음 그림 3.17 과 같이 출력 전류를 검출하여 전류 루프의 Reference 에 더해주게 된다.

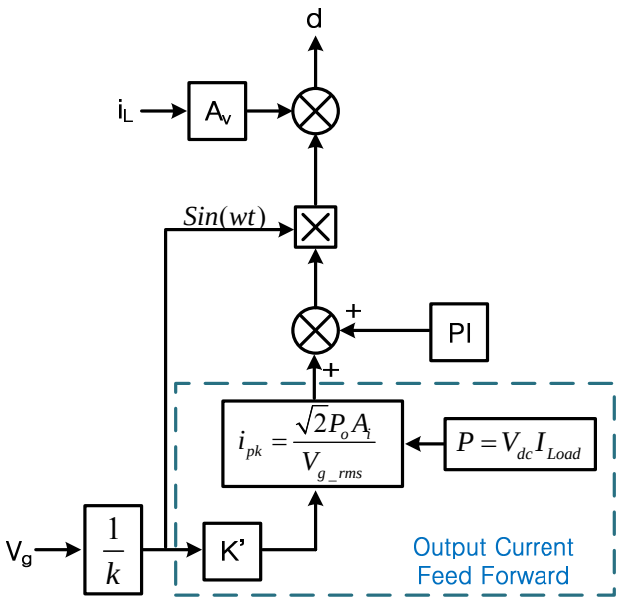

그림 3.17 실험에 사용된 출력 전류 Feed-Forward

제어 루프에 추가되는 Feed-Forward 정보는 제어 루프의 특성을 변화시키지 않으면서 출력 전류 변화에 대한 출력 전압 특성을 향상시키는 결과를 가져오게 된다[25].

전력변환기의 제어 루프 구성은 그림 3.18 과 같이 구성된다. 시스템을 구성하는 입출력 전압, 전류의 관계와 각 블록의 상수는 식 3.9~3.12 에 나타내었다[25].

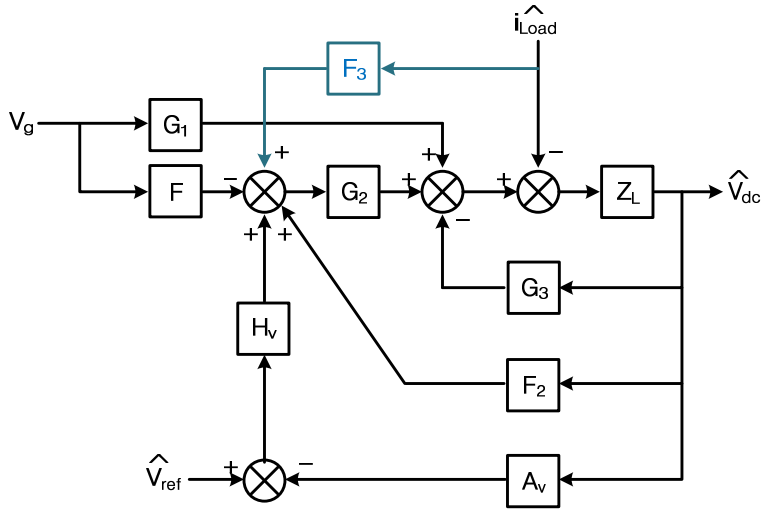

그림 3.18 출력 전류 Feed-Forward가 적용된 Loop 구조

$$\hat{i}_{dc} = \frac{I_{refpk}}{\sqrt{2}A_i V_{dc}}\hat{V}_g + \frac{V_g}{\sqrt{2}A_i V_{dc}}\hat{i}_{refpk} - \frac{I_{dc}}{V_{dc}}\hat{V}_{dc} \tag{3.9}$$

$$\hat{i}_{pk} = \frac{\sqrt{2}A_i V_{dc}}{V_g}\hat{i}_{Load} + \frac{\sqrt{2}A_i I_{Load}}{V_g}\hat{V}_{dc} - \frac{I_{pk}}{V_g}\hat{V}_g \tag{3.10}$$

$$i_{dc} = G_1 V_g + G_2 i_{refpk} - G_3 V_{dc} \tag{3.11}$$

$$i_{pk} = F_3 i_{Load} + F_2 V_{dc} - F_1 V_g \tag{3.12}$$

전력변환기의 출력 임피던스를 감소시키기 위하여 사용된 Feed-Forward 방법은 부하에서 바라보는 출력 임피던스를 식 3.13 에서 3.14 와 같이 전체적으로 감소시키게 된다.

$$Z_o = \frac{1}{Z_L + K + H_v + G_2 + G_3} \tag{3.13}$$

$$Z_{o_ff} = \frac{1 - G_2 F_3}{Z_L + K + H_v + G_2 + G_3 - G_2 F_2} \tag{3.14}$$

Feed-Forward 가 적용된 PFC 의 출력 임피던스는 그림 3.19 와 같이 20dB 가량 감소된 것을 확인 할 수 있다.

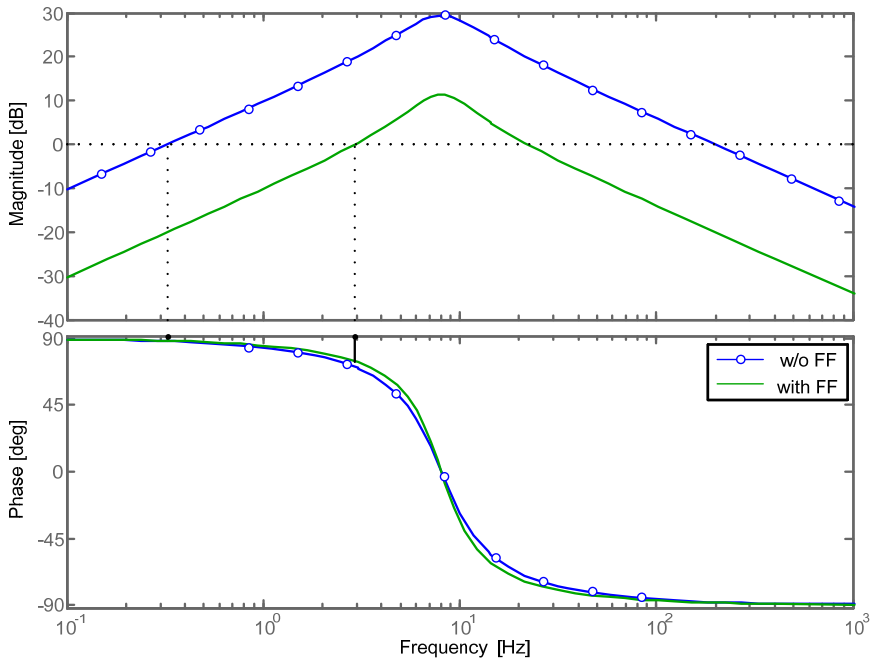

그림 3.19 Feed-Forward 적용에 따른 임피던스 변화

이렇게 줄어든 출력 임피던스는 부하의 입력 임피던스의 최소값과 만나 상화 작용을 일으킬 확률이 줄어 들게 된다. 출력 임피던스 감소에 의해 충분한 Gain margin 이 확보 되었는지 확인하기 위하여 두 시스템의 입·출력 임피던스를 비교하였다. 그림 3.20 의 결과를 살펴보면 Feed-Forward 적용으로 감소된 출력 임피던스 뿐만 아니라, 6dB 의 Gain margin 이 더해진 출력 임피던스의 영역 또한 부하의 입력 임피던스를 간섭하지 않고 있음을 확인 할 수 있다.

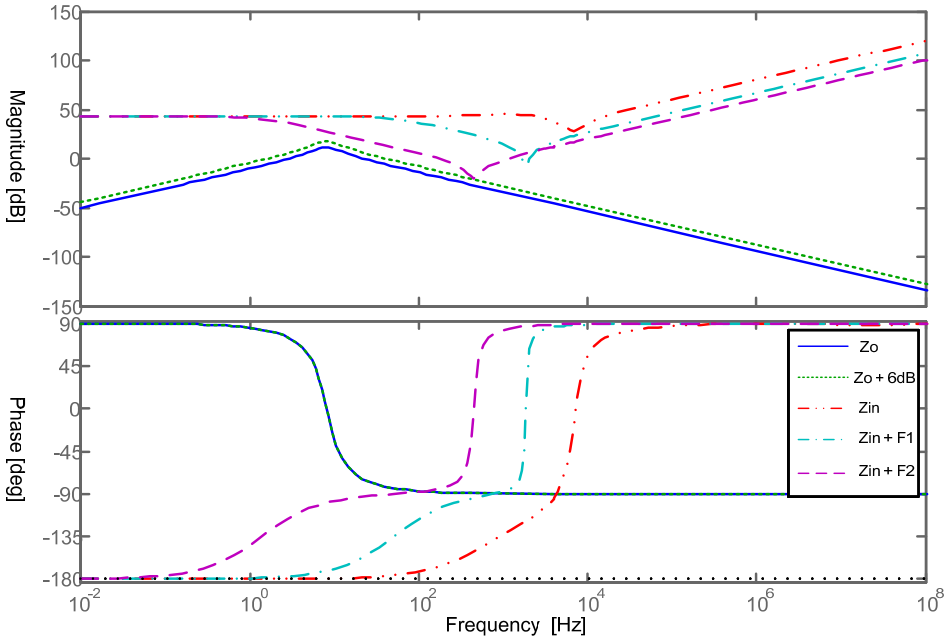

그림 3.20 출력 임피던스 제한 기준과 입력 임피던스 비교

Feed-Forward 기법의 사용으로 PFC 와 부하 시스템간의 충분한 Gain Margin 이 확보된 후에는 두 시스템의 가운데 존재 하는 배전 라인에서 발생되는 임피던스 문제 또한 고려해야 한다. 그림 3.21 에 나타낸 부하의 입력에서 바라보는 입 · 출력 임피던스를 살펴보면 배전라인의 인덕턴스와 캐패시턴스에 의해 발생된 수 kHz 대역의 출력 임피던스가 입력 임피던스보다 크게 형성된 것을 확인 할 수 있다.

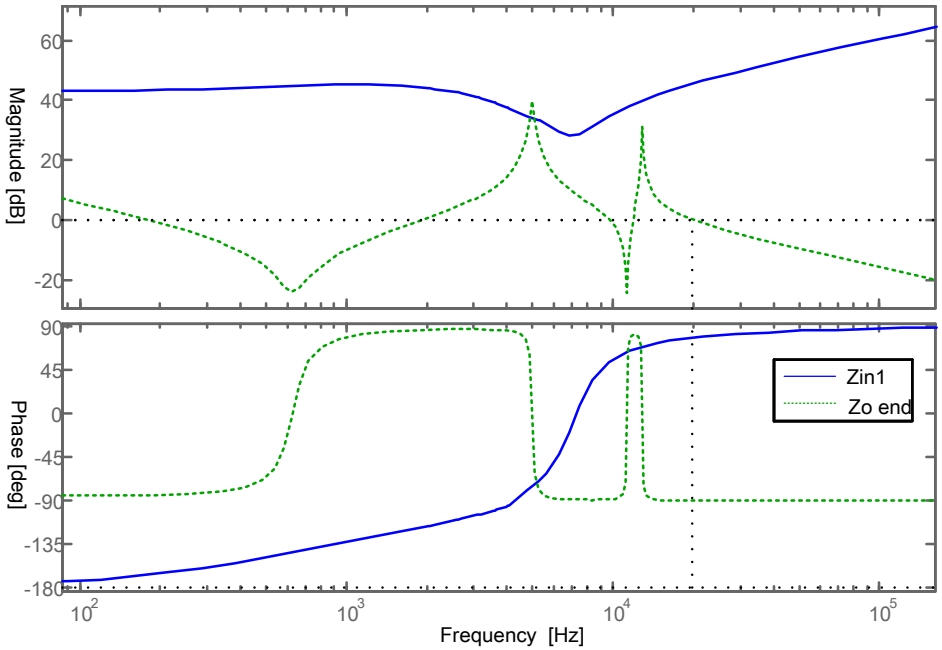

그림 3.21 5kHz 대역의 Impedance Interaction 형태

위와 같은 문제 상황은 임피던스를 형성하는 배전 라인의 캐패시터용량을 변화 시켜 해결 할 수 있다. 배전 라인에 위치한 캐패시터는 추가적인 PFC 의 출력 필터의 역할을 한다. 출력 필터에 의한 임피던스 상호작용(Impedance Interaction)을 피하기 위해서는 필터를 구성하는 인덕터와 캐패시터의 용량을 변화 시켜 출력 필터의 임피던스를 감소 시켜야 한다. 출력 임피던스는 다음 그림 3.22 와 같이 형성되며, 인덕턴스의 감소나 캐패시턴스의 증가로 그 크기를 줄일 수 있음을 확인 할 수 있다[26].

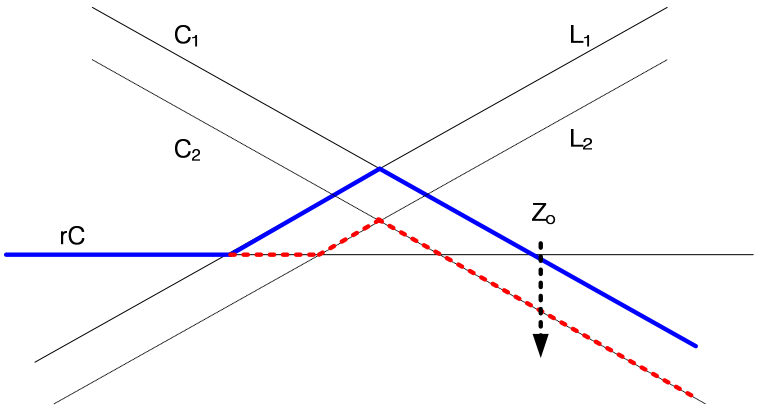

그림 3.22 소자 용량 증가에 따른 필터 임피던스 변화

그러나 현재 문제되고 있는 상황에서 인덕턴스는 배전라인에서 발생한 값으로, 설계자가 감소시킬 수 없는 상황이기에 설계 가능한 요소는 캐패시터가 된다.

배전 라인에 위치한 캐패시터의 크기를 증가시키는데 있어 용량이 과도하게 증가될 경우 시스템의 구성비용이 증가하고, 전해 캐패시터가 사용될 경우 수명 단축 문제가 발생하기 때문에 적절한 용량을 계산 하는 과정이 요구된다. 이를 위하여 두 임피던스가 겹친 주파수 영역에서 그림 3.23 의 Bode plot 을 통해 두 임피던스의 크기를 관찰해 보았다.

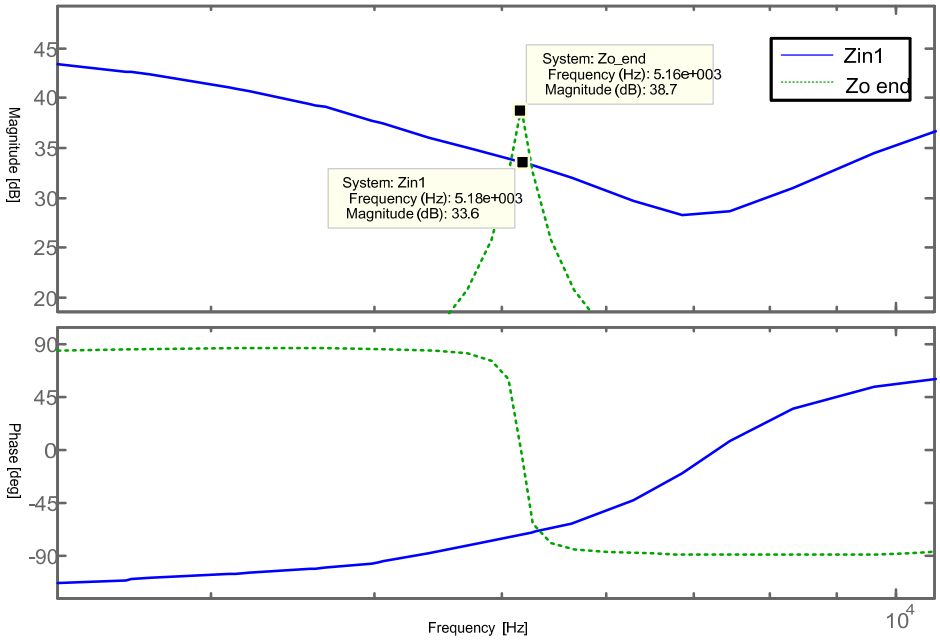

그림 3.23 입출력 임피던스 절대값 비교

그림 3.23 를 살펴보면 출력 임피던스의 크기가 5dB 이상 큰 상태로 앞에서 설명한 것과 같이 Gain Margin 을 포함하여 최소 12dB 정도 더 감소 시켜야 하는 것을 알 수 있다.

출력 임피던스를 12dB 가량 감소시키기 위하여 출력 임피던스의 구성을 살펴보면, 필터를 이루는 인덕터와 캐패시터의 공진점 ω_r 에서 첨두치가 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

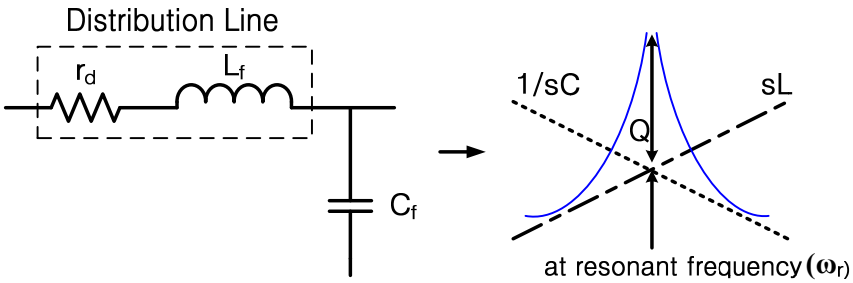

그림 3.24 출력 임피던스 첨두치 분석

그림 3.24 를 바탕으로 출력 임피던스를 나타내면 다음 식 3.15 와 같이 Quality factor 에 의한 부분과 캐패시터-인덕터의 교차점에 의한 임피던스로 나눌 수 있다.

$$Z_{peak} = Q + \frac{1}{j\omega_r C_f} = \frac{1}{r_d}\sqrt{\frac{L_f}{C_f}} + \frac{1}{\omega_r C_f} \qquad (3.15)$$

앞에서 언급된 것과 같이 캐패시터만을 변경하여 16dB 의 임피던스 감소를 만들기 위해서는 식 3.15 로부터 모의 실험에 사용된 10uF 보다 24 배의 용량을 갖는 240uF 의 캐패시터가 필요함을 알 수 있다.

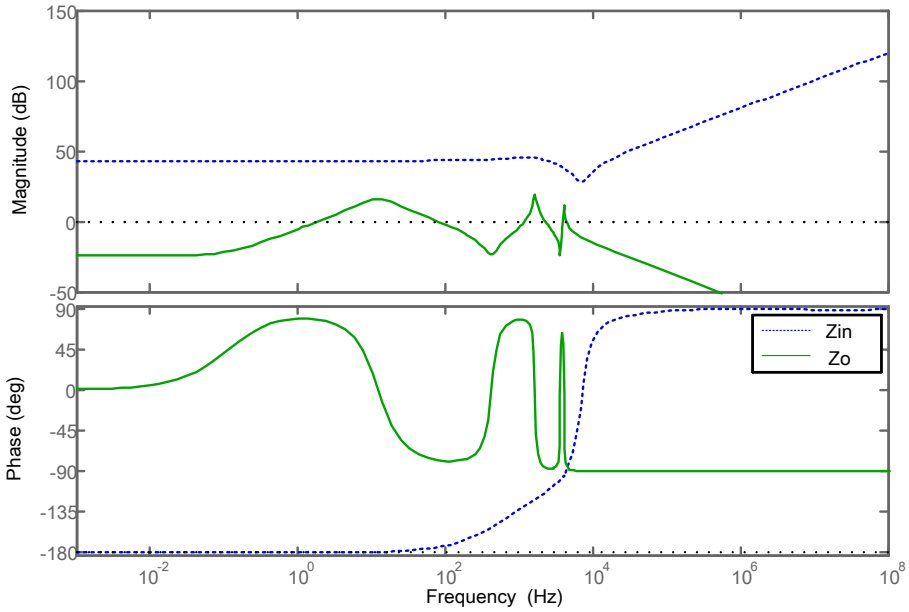

그림 3.25 설계 변경 후 입출력 임피던스 비교

앞에서 설명된 방법과 같이 직류단에 위치한 캐패시터의 용량 증가와 Feed-Forward 사용이 실제 배전 전압 변화에 미치는 영향을 모의 실험을 통해 확인해 보았다. 그림 3.25 는 Feed-Forward 기법을 적용하고 배전라인에 240uF 의 캐패시터를 추가한 Bode Plot 결과이다. 주파수 분석을 살펴보면 수 Hz 단위에서 지적되었던 높은 임피던스가 감소하였으며, 5kHz 부근의 임피던스 문제 또한 해결된 것을 확인 할 수 있다.

그림 3.26 의 모의 실험결과를 통해 시간 영역에서 시스템을 동작을 살펴보면, 직류 배전 라인의 전압은 순간적으로 전압강하를 일으켰다 다시 회복되는 것을 확인 할 수 있다.

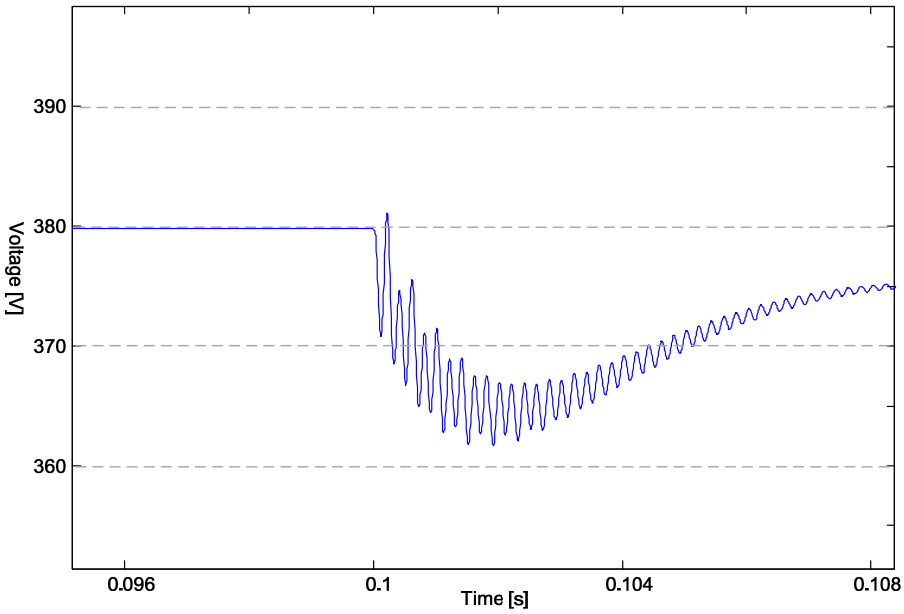

그림 3.26 설계 변경 후 부하 급변시 배전 전압 변화

3.5 모의 실험 결과 분석

3 장에서는 부하 시스템 쪽에서 발생할 수 있는 문제 요소들을 정의하고 그 영향을 살펴보았다.

첫째, 직류 배전 라인의 특성이 부하의 사고 상황에 대처하기 위하여 배전라인에 병렬로 위치하는 캐패시터의 용량이 적정 수준 이상으로 설계되어야 하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 캐패시터의 용량을 배분하는 과정에서 추가되는 부하 시스템에 부담을 덜어 주기 위하여 입력 전력변환기의 출력에 대부분의 용량을 할당하는 설계를 하고 모의 실험을 통해 결과를 확인하였다.

두 번째 상황에서는 배전 라인의 출력 임피던스와 부하의 입력 임피던스에 의한 문제 상황을 확인하고 해결 방법을 살펴보았다. 출력 임피던스 증가에 의해 시스템이 불안정해지는 것을 해결하기 위하여 출력 임피던스를 감소시킬 수 있는 설계 방법을 적용하였다. 출력 전류 Feed-Forward 와 출력 필터 설계를 통하여 위와 같은 문제 상황이 해결되는 것을 확인하였다.

제 4 장 계통 입력 전압 사고 상황 분석

4 장에서는 2.1.1 절에서 언급하였던 계통 입력 전압이 불안정한 상황에서 직류 배전전압을 살펴볼 수 있는 시스템을 설계하고, 직류 전압의 변동 정도를 살펴본다. 또한 모의 실험 결과를 바탕으로 직류전압의 변동폭을 일정 범위 내로 제한 할 수 있는 해결 방법을 모색하고, 적용 결과를 토대로 직류 배전 시스템의 설계에 반영하는 기준을 제시한다.

4.1 계통 사고 상황 설계

계통에서 공급되는 교류 입력 전압에 문제가 생기는 상황을 구성하기 위하여 아래 그림 4.1 의 입력 사고 상황의 동작 규정을 모의실험에 적용하였다[12].

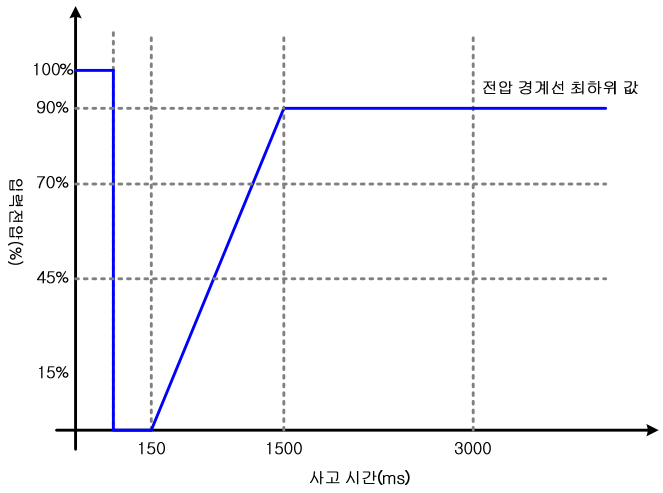

그림 4.1 계통 입력 사고 시 규정 경계선

모의 실험에서는 80%~20%의 감소된 계통 전압이 들어오는 경우를 고려 하였으며 그림 4.1 의 기준에 따른 각 상황의 사고 시간의 최대 값은 다음 표 4.1 과 같이 계산되었다.

표 4.1 입력 전압 감소율과 최대 사고시간

입력전압 / 입력기준전압	0.8	0.6	0.4	0.2
사고시간[s]	1.55	1.05	0.75	0.45

입력 전압 강하 상황을 모의 실험할 교류/직류 전력변환기의 토폴로지로는 Boost 가 고려되었으며, 평균 전류모드 제어(Average Current Mode Control)와 출력 전압 제어를 적용하였다[12]. 모의실험에 사용된 Boost PFC(Power Factor Correction Circuit)는 1kW 의 전력 용량과 100~240VAC 의 입력이 모두 가능한 Universal Type 으로 설계되었다. 또한 전력 변환기의 출력 캐패시터는 출력 직류 전압의 리플 기준을 만족 시킬 정도로 최소화된 용량이 사용되었다. 모의실험에 사용된 Boost PFC 의 설계 기준을 아래 표 4.2 에 나타내었다.

표 4.2 시스템 설계 사양

Vin[V]	100~240 (AC)	Vout[V]	380
Po_max [W]	1000	Vo_ripple [V]	±20
인덕턴스 [H]	0.001	Capacitance [uF]	800

모의 실험에서는 위와 같이 설계된 Boost PFC 에 표 4.1 의 전압강하 시간을 적용하여 각각의 경우에 발생하는 전압 변동을 관찰하였다.

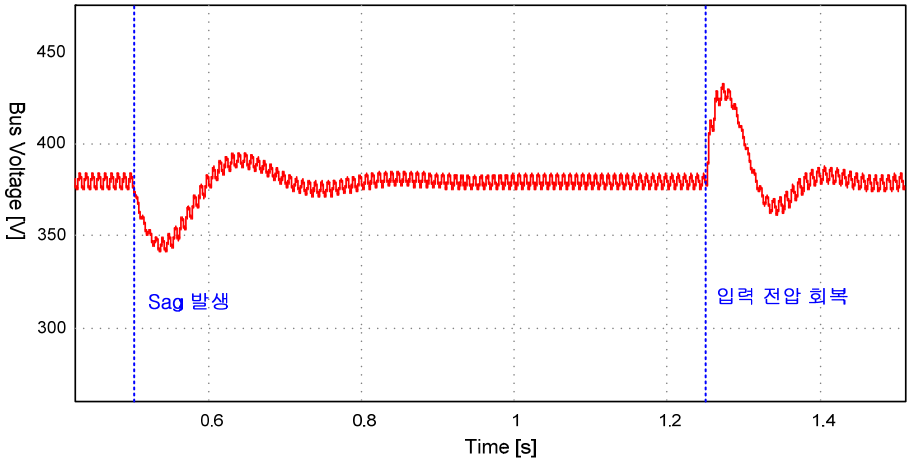

그림 4.2 80% 계통 입력 및 회복 상황에서의 배전 전압 변화

그림 4.2 는 정상 입력전압 대비 80%의 입력전압이 공급 되었을 때 직류단 전압의 변동을 관찰한 것으로, Sag 가 발생하는 시점에서 순간적으로 직류단 전압이 감소하였다가 Sag 가 회복되는 시점에서 전압이 솟아 오르는 것을 확인 할 수 있다. 모의 실험에서 관찰된 순시 전압 강하와 전압 상승은 직류 배전 라인의 전압이 흔들리는 정도를

나타내며, 이는 배전라인에 연결된 부하 시스템에 입력 전압 범위와 연결되어 부하의 동작에 결정하게 된다. 나머지 20%, 40% 그리고 60%의 입력 전압 Sag 상황에 대하여 모의실험을 진행하고 그 결과를 아래 그림 4.3 에 나타내었다.

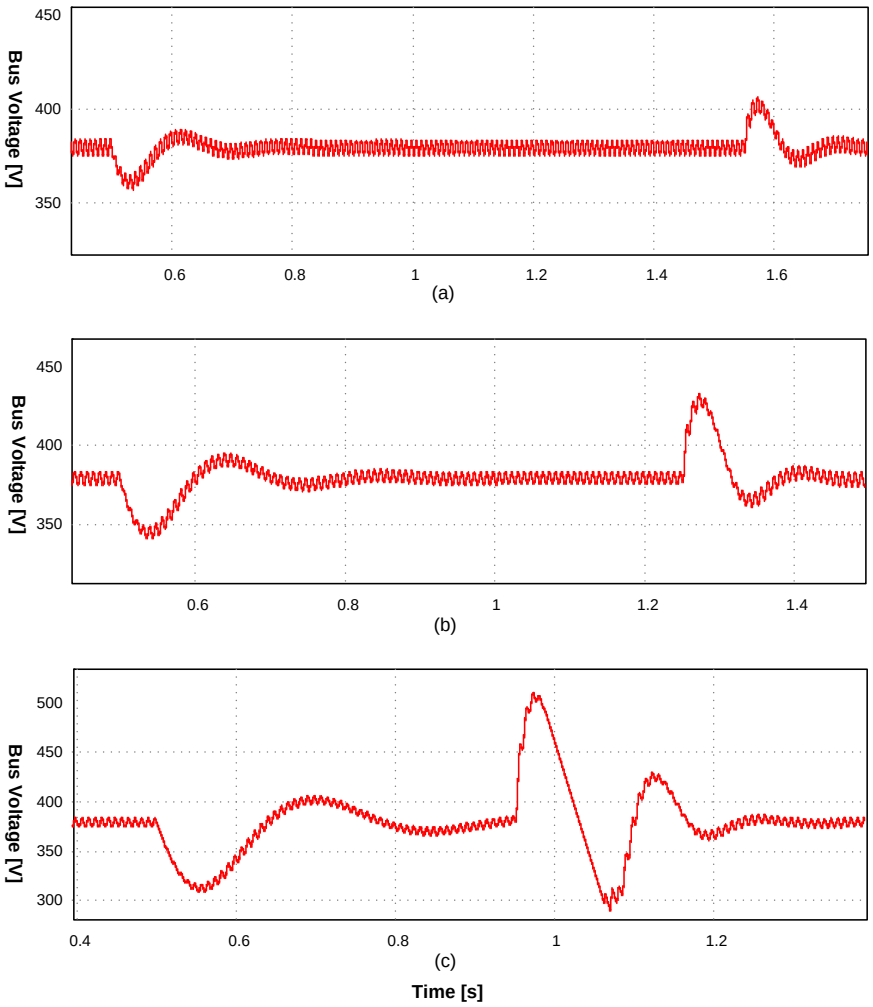

그림 4.3 계통 사고 입력 전압 변화와 배전 라인 전압의 변화:
(a) 60% 입력 (b) 40% 입력 (c) 20% 입력

앞의 모의 실험 결과에 따른 Sag 크기와 출력 전압의 관계를 살펴보면 교류 입력 전압의 감소폭이 증가함에 따라 직류 전압이 점점 더 불안정해지는 모습을 확인 할 수 있다. Sag 발생시 전압강하는 최악의 경우 부하 시스템 동작이 정지할 수 있으며, Sag 회복시의 직류 전압 상승은 부하 시스템의 반도체 소자의 파괴를 불러 올 수 있다.

표 4.3 Sag 시간 별 직류단 전압 측정치

입력전압 비율	사고시간 [s]	직류단 최소전압[V]	직류단 최대전압[V]	전압 불안정 구간 [ms]
80%	1.35	368	392	0
60%	1.05	357	406	21
40%	0.75	341	432	47, 56
20%	0.45	309	509	47,70, 110

모의실험에서 측정된 직류단 전압을 살펴 보면 배전 전압 강하 수치가 60%의 sag 가 발생한 시점부터 직류 전압 설계치인 380V ±20V 의 범위를 벗어나는 것을 확인 할 수 있다. 그림 4.1 의 전압 강하 기준을 적용했을 때 모의 실험에 사용된 직류 배전 건물의 교류/직류 전력변환기는 이 기준을 만족 시키지 못하고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 60%이상의 Sag 가 회복 되는 시점에서 직류 배전 라인의 최대 전압이 400V 를 넘어서는 것을 확인 할 수 있어 이 또한 기준을 만족시키지 못하는 것을 확인 할 수 있다.

4.2 직류단 안정화 방법

4.1 절에서 관찰된 직류 배전라인의 전압 변동은 계통으로부터 발생된 입력 전압 변동이 교류/직류 전력변환기의 전달함수를 통해 순간적으로 출력전압이 감소된 것과 일정한 전력을 소비하고 있는 부하에 의해 발생한 것으로 생각 할 수 있다.

배전 전압의 변동 원인을 살펴보기 위하여 모의 실험에서 사용된 Boost PFC 의 전달함수를 다음 그림 4.4 와 식 4.1 같이 나타내었다. 그림 4.4 에 사용된 V_g, V_o, μ, L_e 와 C 는 각각 입력전압, 출력전압, 전압 전달비, 등가 인덕턴스, 출력 캐패시터다.

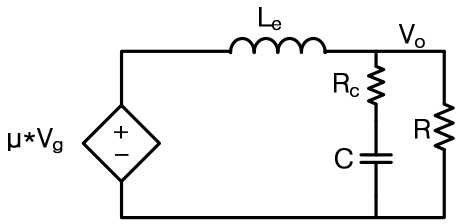

그림 4.4 교류/직류 전력변환기의 입출력 전압 전달함수

$$V_o = \mu V_g \frac{(\frac{1}{sC} + rC) \| R}{(\frac{1}{sC} + rC) \| R + sL_e} \tag{4.1}$$

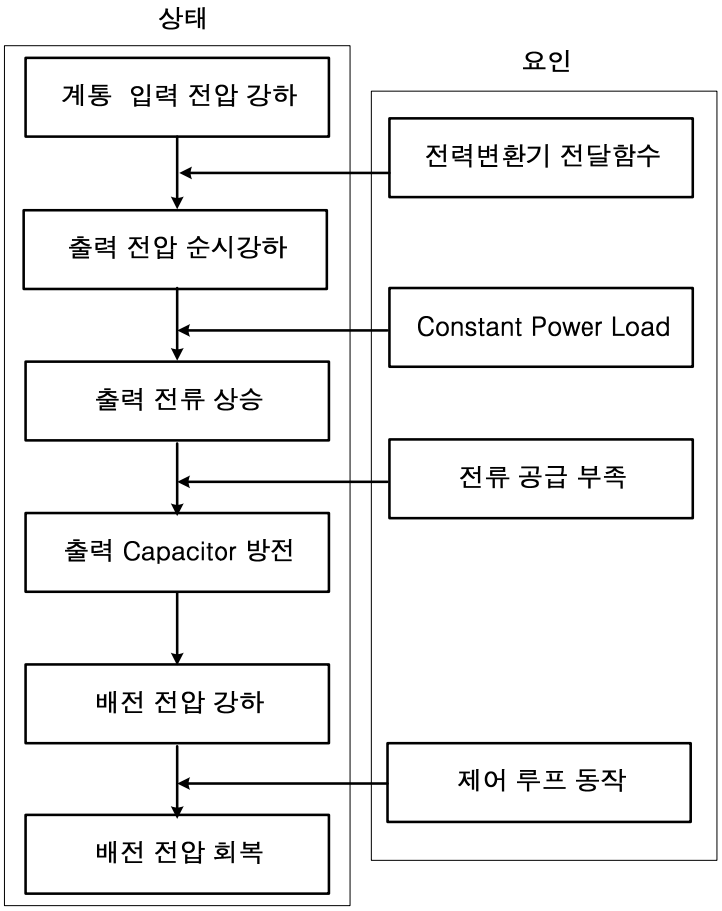

그림 4.5 배전 전압 강하 과정

식 4.1 의 전달함수 관점에서 입력 변동에 따른 출력 전압 불안정 현상은 다음 그림 4.5 와 같이 분석할 수 있다. 출력단을 구성하는 캐패시터의 방전으로 인하여 배전 전압이 감소 하기 때문에 3.2 절의 상황과 같이 생각할 수 있고 식 3.4 와 3.5 를 통하여 출력 캐패시터 용량 증가를 통하여 배전 전압의 흔들림이 줄어들 것을 예상할 수 있다.

캐패시터 용량 증가에 따른 직류 배전 전압의 변화를 관찰 위하여 출력 캐패시터의 용량을 2 배 증가된 1.6mF 으로 변경하여 모의실험을 다시 진행 하였다. 4.1 절과 같은 방법으로 4 가지 입력 전압 Sag 에 대하여 모의 실험을 진행하여 입력 전압 Sag 에 따른 배전 전압의 최대 · 최소값과 배전전압이 기준전압을 벗어난 시간을 표 4.4 에 나타내었다.

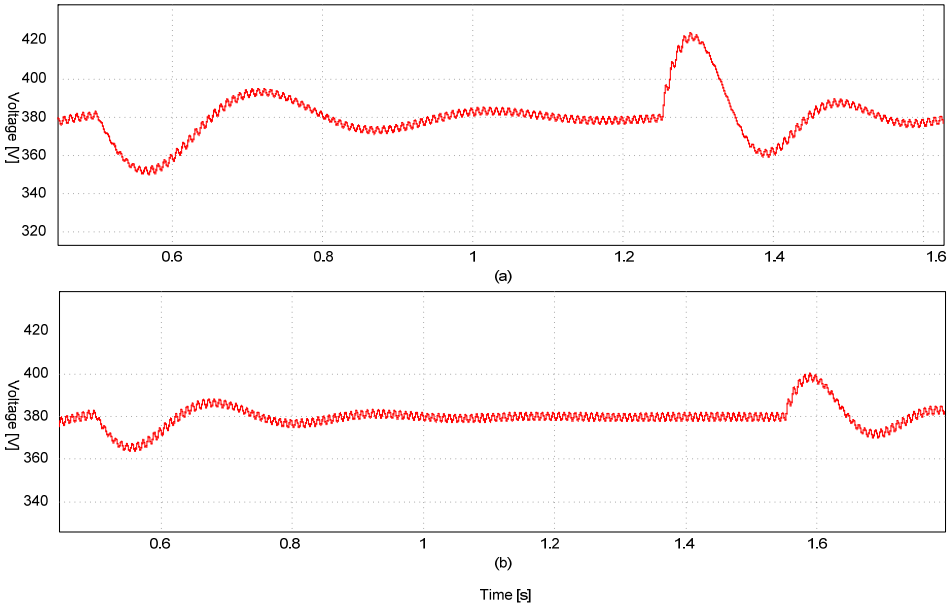

그림 4.6 캐패시터 용량 증가 후 배전 라인 전압 변화:
(a) 20% 계통 입력 (b) 60% 계통 입력

표 4.4 캐패시터 용량 증가에 따른 배전 전압 변화 수치

입력전압 비율	사고시간[ms]	직류단 최소전압[V]	직류단 최대전압[V]	전압 불안정 구간 [ms]
80%	1.35	372	388	0
60%	1.05	363	400	0
40%	0.75	350	423	66,71
20%	0.45	323	461	63,95,156

실험 결과를 살펴보면 추가된 캐패시터의 영향으로 표 4.4 의 실험 결과에 비해 배전 전압의 변동 폭이 줄어 드는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 입력 전압 Sag 발생으로 40% 이하의 배전 전압 강하가 발생하였을 때 여전히 기준 전압에서 크게 벗어 남을 확인 할 수 있다.

최근 380VDC 의 배전 전압을 기준 전압으로 사용하고 있는 직류 배전 시스템의 추세에서 450VDC 정도의 내압을 가지는 스위치를 사용하는 것을 고려 했을 때 더욱 큰 용량의 캐패시터가 요구되지만 그 크기가 계속 증가할 경우 시스템의 속도와 돌입 전류 문제에 직면하게 된다.

따라서 입력 전압 Sag 가 일어나는 순간과 회복되는 순간의 순시 전압 강하, 상승을 제한한 하기 위해 전력변환기의 동적 특성을 향상시키는 방향을 생각해 볼 수 있다. Sag 의 발생, 회복 순간 전압 변동을 살펴보면 일정한 전력이 부하로 계속 공급되는 가운데 순간적인 출력 전류 상승과 맞물려 전압 강하가 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

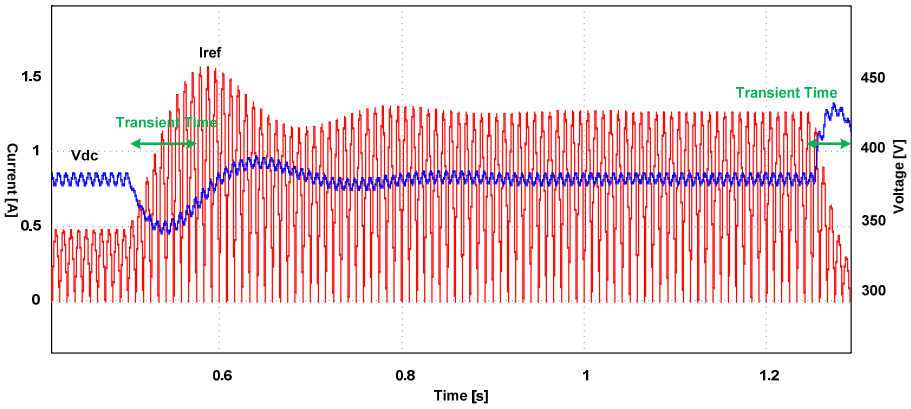

그림 4.7 Sag 상황에서 전류 reference 및 배전 전압 변화

위 그림 4.7 과 같은 제어 루프의 특성은 PFC 로 사용되는 전력변환기의 설계 특성상, 10Hz 정도의 낮은 전압 루프 Gain 을 가지는 것에서 기인한다. 이러한 제어 루프의 특성을 개선해 주기 위하여 Sag 가 일어나는 순간, 전류 Reference 에 입력전압의 변화 정보를 넣어 전류 Reference 가 변하는 시간을 줄여 전력변환기의 특성을 향상시키는 방법을 사용하였다[15]. 입력 전압 변동 상황에서 전류 Reference 를 변화시키는 방법은 다음 그림 4.8 과 같은 방법으로 구성되었다.

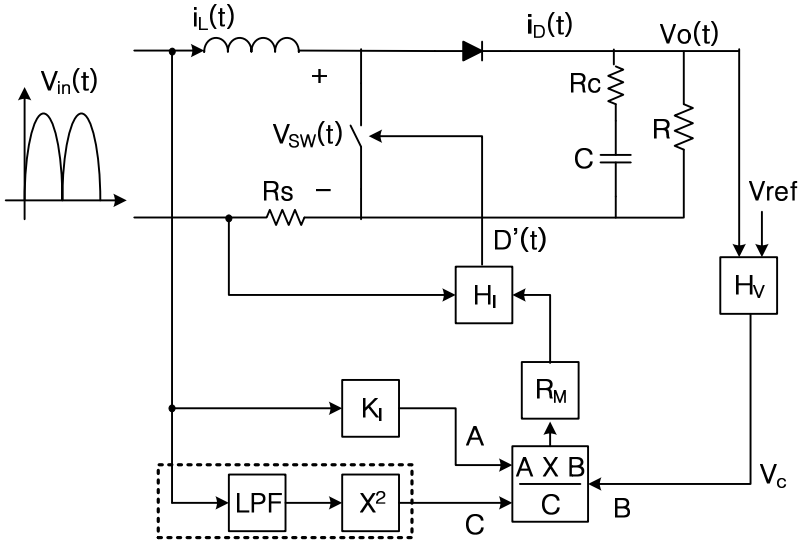

그림 4.8 입력 전압 변화에 대응할 수 있는 전류 reference 수정방법

위 방법은 전류 Reference 가 입력 전압에 대응하여 변화하면서, 전력변환기의 제어루프 구성에 영향을 미치지 않음과 동시에 입력 전압의 갑작스런 변화에 대응 할 수 있는 장점을 가진다. 위 방법이 적용된 모의 실험의 결과를 다음 그림 4.9 와 표 4.5 에 정리하였다.

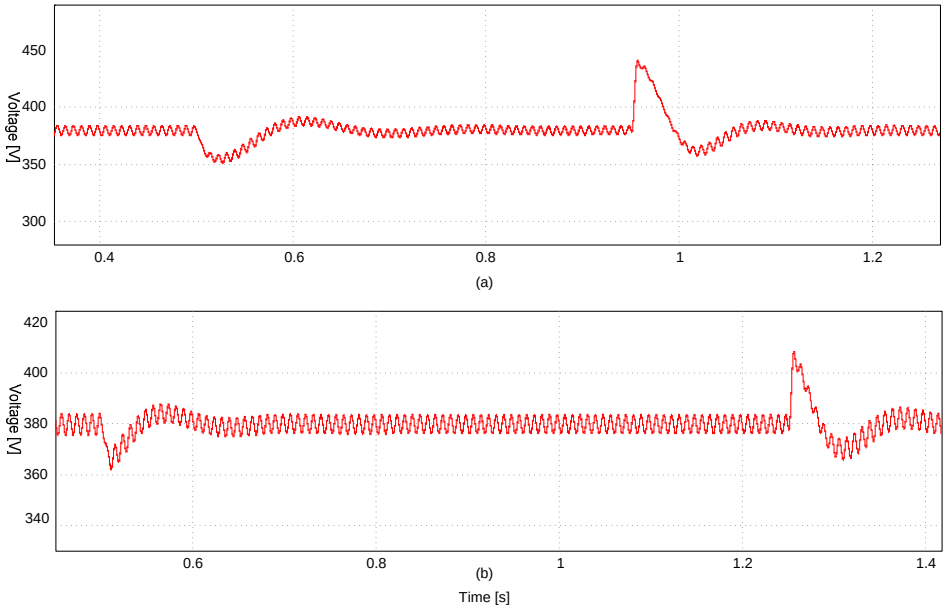

그림 4.9 전류 reference 수정 후 배전 전압 변화: (a) 적용 전 (b) 적용 후

표 4.5 전류 제어 루프 수정 후 실험결과

입력전압 비율	사고시간[s]	직류단 최소전압[V]	직류단 최대전압[V]	전압 불안정 구간[ms]
80%	1.35	371	389	0
60%	1.05	366	396	0
40%	0.75	362	408	0
20%	0.45	351	441	36

전류 Reference 구성이 변경된 모의 실험 결과를 살펴보면 40%의 입력전압 Sag 가 일어나는 순간 배전 전압이 작은 폭으로 기준 전압에서 벗어나는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 전류 Reference 의 구성 변경이 앞에서 실험한 캐패시터의 용량을 증가 시키는 방법과 함께 출력 전압

제어에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 실제 부하 시스템의 하드웨어 구성에서 450VDC 의 내압규격을 갖는 스위치 소자들이 고려되고 있는 것을 생각할 때 20%의 입력 전압 Sag 에서 관찰된 440VDC 의 전압상승은 추가적인 설계 조정을 통하여 문제 해결의 가능성이 있음을 생각해 볼 수 있다.

4.3 모의 실험 결과 분석 및 결론

앞 절의 모의 실험 결과들을 바탕으로 실제 구성될 직류 배전 시스템에서 직류 배전 전압이 안정화 될 수 있도록 계통에서의 사고 상황을 제어할 수 있는 설계 요구 조건을 정의해 볼 수 있다. 직류 배전 시스템 구성에 있어 입력단 교류/직류 전력변환기는 입력 전압 사고 상황에 대하여 일정 범위 안으로 출력 직류 전압을 제어 해야 하는 요구 조건을 가지게 된다. 본 논문에서는 옥내 배선에서 400V 이상의 전압사용을 규제하고 있는 내선 규정에 따라 직류 배전 라인의 전압 변동폭을 380VDC ± 20V 로 정의 하고 모의 실험 결과를 토대로 두 가지 해결 방법을 같이 적용하여 모의 실험을 진행하였다.

또한 입력전압 변동에 대한 직류 배전 전압의 영향을 설계 기준에 맞추기 위해서 전류 Reference 를 조정하는 방법과 전력변환기의 출력에 1.8mF 의 캐패시터를 추가하는 방법을 같이 사용하여 실험을 진행하였다.

표 4.6 계통 입력 사고 상황과 배전 라인 전압 변화 – 설계 변경 후

입력전압 비율	사고시간[ms]	직류단 최소전압[V]	직류단 최대전압[V]	전압 불안정 구간 [ms]
80%	1.35	377	382	0
60%	1.05	376	384	0
40%	0.75	374	388	0
20%	0.45	371	398	0

표 4.6 을 살펴보면 감소된 입력 전압들이 배전 전압에 미치는 영향이 표 4.3~ 4.5 의 결과에 비해 크게 줄어 들었음을 확인 할 수 있다. 또한 그림 4.10 과 같이 내선 규정을 바탕으로 직류 배전 전압을 400V 이하로 제한한 설계 기준도 충족 시킴을 확인 할 수 있다.

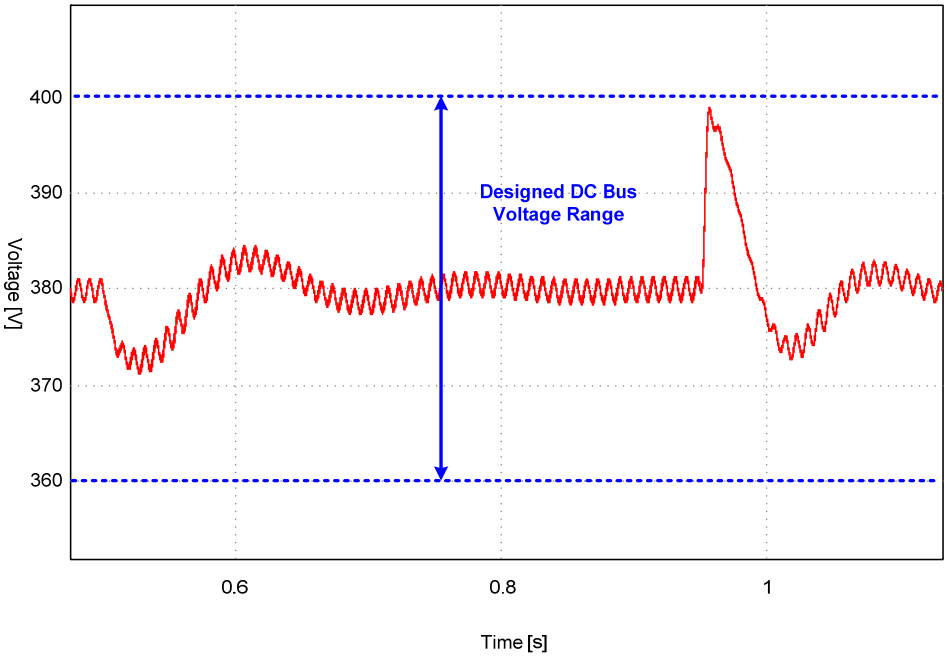

그림 4.10 제시된 설계 기준이 적용된 모의 실험 결과 – 배전라인 전압 변화

제 5 장 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 직류 배전 시스템을 구성함에 있어, 기존 시스템과 대등한 성능과 안정성을 보장하기 위해 고려해야 하는 요소들을 정의하였다. 또한 각 요소들에 의한 시스템의 전압 불안정 상황을 모의 실험을 통해 확인하고 해결 방법들을 제시하였다.

직류 배전 시스템은 기존 시스템을 변경함에 있어 전원 공급 부분과 부하 시스템에 변화가 발생하게 된다. 각 부하에 위치하였던 교류/직류 전력변환기를 하나의 시스템으로 구성하여 배치하고, 모든 부하 시스템이 같은 전력변환기의 출력에 연결되어 동작함으로써 기존에 발생하지 않았던 문제점들이 제시되었다. 에너지 효율 증가를 위해 선택된 직류 배전 시스템이 기존 시스템을 대체하기 위해서는 효율뿐만 아니라, 시스템의 안정성 또한 보장되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 안정적인 동작을 보장 할 수 있도록 추가적으로 요구되는 설계 기준들을 정의하고 각각의 기준이 적용되는 대상을 결정하였다.

3 장에서는 시스템이 안정한 가운데, 부하가 연결된 배전라인에서 발생하는 사고가 배전 전압에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 연결된 시스템들의 임피던스가 적절히 고려되지 않았을 경우 발생 가능한 문제에 대하여 살펴보았다. 문제점을 해결하기 위하여 사고 상황에서 배전 전압의 변동을 제한할 수 있는 출력 캐패시터의 용량을 계산하고, 불안정한 상황을 해결 하기 위하여 배전 라인의 출력 임피던스를 제한하였다.

4 장에서는 계통 입력에서 발생하는 일시적인 사고상황이 배전 전압의 질을 떨어뜨리는 것을 확인 하고, 이를 해결 하기 위해 교류/직류 전력변환기의 출력필터 설계와 제어 방법을 적용 하였다. 두 방법을 통하여 입력 사고 상황에서도 안정적으로 부하 시스템의 동작을 보장할 수 있는 배전 라인이 설계되었음을 확인하였다.

향후 진행될 연구에서는 모의 실험 과정에 있어 고려 되지 못했던 퓨즈의 물리적인 특성이나 시스템의 주파수 분석을 통한 안정성 판별 과정, 다양한 구조에 따른 문제상황의 변화를 반영하여 보다 자세한 결과를 도출하는 것이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

[1] Daniel Salominsson and Ambra Sannino, “Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads,” IEEE *Transactions on Power Delivery*, Vol.22, pp.1620-1627, July 2007.

[2] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura and Toshifumi Ise, “Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.25, pp.3066-3075, December 2010.

[3] Alexis Kwasinski, “Quantitative Evaluation of DC Microgrids Availability: Effects of System Architecture and Converter Topology Design Choices,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.26, pp.835-851, March 2011.

[4] Annabelle Pratt, Pavan Kumar and Tomm V.Aldridge, “Evaluation of 400V DC Distribution in Telco and Data Centers to Improve Energy Efficiency,” in *Proc. of Telecommunications Energy Conf*, pp.32-39, 2007.

[5] 최우인, 백종복,”교육용 실대상 건물에 대한 직류 배전 시스템 설계,” *케이디파워 2차년도 연구 보고서*, 2012년 5월.

[6] Zhihong Ye, Kun Xing, F.C.Lee, “Impedance specification and impedance improvement for DC distributed power system,” in *Proc. of Power Electronics Specailists Conference(PESC99)*, Vol.2, pp.889-894, 1999.

[7] B.H.Cho, *Modeling and Analysis of Spacecraft Power Systems*, Ph.D. Dissertation, VPI&SU, Blacksburg, VA, October 1985.

[8] Steven E.Schulz, *System Interactions And Design Considerations For Distributed Power Systems*, Ph.D Dissertation, VPI&SU, Blacksburg, VA, January 1991.

[9] Igor Cvetkovic, *Modeling, Analysis and Design of Renewable Energy Nanogrid Systems*, Master Dissertation, VPI&SU, Blacksburg, VA, January 2010.

[10] Wildrick,C.M, F.C.Lee and B.H.Cho, "A Method of Defining the Load Impedance Specification for A Stable Distributed Power System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.10, pp.280-285, May 1995.

[11] Allen&Bradley, "Standard AC Power Supplies," *Publication 1756-TD005C-EN-E*, January 2012.

[12] Bayreuth, "Grid Code for High and Extra High Voltage," in *research paper of E.ON Netz GmbH*, 1st April 2006.

[13] Byungcho Choi and Donggyu Lee, "Effects of Loading on Dynamic Performance of Switching Power Converters," *in Proc. of ICEE conference*, pp.196-201, 2004.

[14] W.Tang , F.C.Lee and R.B.Ridley, "Small-signal Modeling of Average Current-Mode Control," *in Proc. of APEC '92. Conference*, Seventh Annual, pp.747-755, Feb 23-27 1992.

[15] Fakhralden A. Huliehel, Fred.C.Lee and B.H.Cho, "Small-Signal Modeling of The Single-Phase Boost high Power Factor Converter with Constant Frequency Control," in *Proc. of Power*

Electronics Specialists Conference PESC'92, pp.475-482, Jun29-Jul 3 1992.

[16] Yousuke Nozaki, "Development of Higher-voltage Direct Current Power Feeding System for ICT Equipment," in *NTT Technical review*, Vol.7, No.10, 2009.

[17] T. K. Phelps and W. S. Tate, "Optimizing Passive Input Filter Design," in *Proc. of the Sixth National Solid- State Power Conversion Conference(Powercon 6)*, pp. G1.1-G1.10, May 1979.

[18] "International Standard IEC60228," in *IEC International standard*, 2004.

[19] James Howard, " An Open Architecture Approach to buried passive Components," *PCD&M*, pp.40-41, December 2003.

[20] Dushan Boroyevich, "Intergrid: A Future Electronic Energy Network?," in *Opening Plenary Session, IEEE APEC 2011, Fortworth*, March7 2011.

[21] R.D.Middlebrook, "Input filter Considerations in Design and Application of Switching Regulators," IEEE IAS Rec., 1976.

[22] B.H.Cho and B.Choi, "Analysis and Design of Multi-Stage Distributed Power Systems," in *Proc. of INTELEC conference,* November 1991.

[23] L.R.Lewis, B.H.Cho and F.C.Lee, "Modeling, Analysis and Design of Distributed Power Systems," in *Proc. of IEEE 1989 PESC Rec*, June 1989.

[24] C.M.Wildrick, F.C.Lee and B.H.cho, "A Systematic Procedure to Generate Load Impedance Specifications in Distributed Power

Systems," in *Proc. of IEEE PESC Conference*, June 1993.

[25] R.B.Ridley, "Average Small-Signal analysis of The Boost Power Factor Correction Circuit," in *Proc. of VPEC seminar*, VPI&SU, Blacksburg, VA, 1989.

[26] Byuncho Choi and B.H.Cho, "Intermediate Line Filter Design to Meet Both Impedance Compatibility and EMI Specifications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.10, pp.583-588, September 1995.

[27] Byungcho Choi, Jaeyeol Kim and B.H.Cho, "Designing Control Loop for DC-to-DC Converters Loaded With Unknown AC Dynamics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.49, pp.925-932, August 2002.

[28] Sandra Y.Erich and William M.Pollvka, "Input Filter Desing for Current-programmed Regulators", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.7, pp.143-151, January 1992.

[29] Mikko Hankaniemi and Teuvo Suntio, "Load-Impedance Based Interactions in Regulated Converters", in *Proc. of Telecommunications Conference 2005(INTELEC)*, pp.569-573, September 2005.

ABSTRACT

Recently, the use of Renewable Energy has been increased according to the natural environmental pollution, exhaustion of natural resources and global warming. And researches about efficient way of renewable energy system installation are being done. A possible alternative is DC(Direct Current) distribution system which increases an efficiency of energy conversion with renewable energy system. A scope in the research of DC distribution system has expanded to residential buildings beginning with Internet Data Centers.

DC distribution systems convert AC power to DC power at the panel board and supply DC power to Load system through DC distribution Line. This structure can improve system's energy efficiency by reducing energy conversion stage.

In this paper, voltage variation of DC distribution system and effects of stability on entire system's operation will be analyzed. In case of DC distribution system, output impedance of distribution line is affected by finite output impedance of AC/DC converter in panel board. Therefore analyses of Impedance interaction and system fault between system components are required to supply high quality power.

To figure out system components which make distribution voltage variation, dc distribution system example is composed of a pre-regulator and load converters. Load step change and system fault is applied to example to view the voltage variation and system stability. From this simulation, design criteria and guide are proposed.

Keywords : DC distribution system, distribution line voltage, stability

Student Number : 2010-20813